

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINE AMADORI

EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA, A PARTIR DO SOLO, EM
SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

CURITIBA

2019

CAROLINE AMADORI

EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA, A PARTIR DO SOLO, EM
SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Coorientadora: Dra. Josiléia Acordi Zanatta
Coorientador: Prof. Dr. Anibal de Moraes

CURITIBA

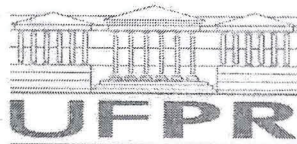
2019

A481e Amadori, Caroline
Emissão de gases de efeito estufa, a partir do solo, em sistemas integrados de produção agropecuária / Caroline Amadori. - Curitiba, 2019.
84 p.: il.,

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo.
Orientador: Jeferson Dieckow
Coorientadora: Josiléia Acordi Zanatta
Coorientador: Anibal De Moraes

1. Efeito estufa (Atmosfera) - Paraná. 2. Solos. 3. Metano. 4. Solo - teor de nitrogênio. I. Dieckow, Jeferson (Orientador). II. Zanatta, Josiléia Acordi (Coorientadora). III. Moraes, Anibal De (Coorientador). IV. Título. V. Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.416(816.2)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **CAROLINE AMADORI** intitulada: **Emissão de gases de efeito estufa, a partir do solo, em sistemas integrados de produção agropecuária**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 01 de Fevereiro de 2019.


JEFERSON DIECKOW

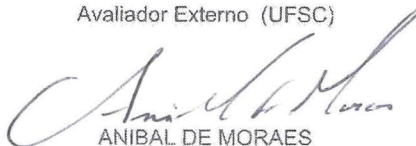
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


NERILDE FAVARETTO

Avaliador Interno (UFPR)


JONATAS THIAGO PIVA

Avaliador Externo (UFSC)


ANIBAL DE MORAES

Coorientador - Avaliador Externo (UFPR - DFF)

*Aos meus pais, Laudir e Lurdes,
Aos meus irmãos, Sandra e Rodrigo,
E aos meus sobrinhos, João Eduardo e Joaquim,
Sem vocês nada disso seria possível,
Com amor, dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus passos e estar sempre comigo.

A minha família, pelo apoio incondicional, pela força e pelo amor. Apesar da distância vocês sempre estiveram ao meu lado.

Ao Professor Dr. Jeferson Dieckow, pela orientação, pelos ensinamentos, pelo exemplo de ética e profissionalismo e pela fundamental contribuição ao meu crescimento profissional.

A Pesquisadora Dra. Josiléia Zanatta, pela coorientação, pelos ensinamentos, pelo exemplo profissional e pelo auxílio com as análises cromatográficas.

Ao Professor Dr. Anibal de Moraes, pela coorientação e pela disponibilização do experimento do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária.

A banca examinadora de defesa da tese, Professor Dr. Jonatas Piva, Professora Dra. Nerilde Favaretto e Professor Dr. Anibal de Moraes, pelas valorosas contribuições com o trabalho.

Aos colegas do Grupo de Manejo do Solo, Julia, Ricardo, Priscila, Mariana, Bruna e Reinaldo; por toda ajuda profissional e pessoal, pela troca de conhecimentos, e pelo indispensável suporte nas coletas de campo.

Aos estagiários, Paola, Marcelo, Ezequias, Bruno, Carlos Eduardo e Michele, por todo auxílio indispensável nas atividades de campo.

Aos colegas da pós-graduação, e principalmente aos da Casa de Estudos da Pós, pela troca de conhecimento, pelas conversas científicas ou não, sempre com café e pelo apoio em todos os momentos. Em especial, aos amigos Elaine, Rangel e Eduardo.

As amigas do coração que a pós me trouxe, Julia, Marciéli, Verediana, Luana e Alessandra, pela amizade incondicional, por estarem ao meu lado em todos os momentos sempre me incentivando e me fazendo feliz.

Aos estagiários e colegas do NITA, Thales, Breno, Daniela, Renata, Rubia e Charles, pelo auxílio nas atividades do experimento.

A Pós Graduação em Ciência do Solo e seus Professores, pelos ensinamentos e pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

A UFPR e seus servidores. As laboratoristas do DSEA, pelo auxílio nas análises. Aos funcionários da Fazenda Canguiri, por todo suporte com atividades no

campo. E a secretária da pós, Denise, por fazer seu trabalho sempre transmitindo alegria e energia positiva a todos.

A Embrapa pela disponibilização dos equipamentos. E as laboratoristas Nadia e Marcela, pelo auxílio nas análises.

A CAPES pelo auxílio financeiro.

A todos, Muito obrigada!

RESUMO

O aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, provavelmente por atividade antrópica, tem provocado mudanças climáticas e se tornou um dos principais desafios atuais da humanidade. Devido a sua participação nas emissões brasileiras, o setor agropecuário busca alternativas para uma intensificação sustentável da produção, como os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA). Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi ampliar a discussão e avaliar a atuação dos SIPA na mitigação das emissões de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), a partir do solo, através de uma revisão de literatura sobre as emissões de N_2O do solo em SIPA e um experimento realizado a campo. A pesquisa relacionando emissão de N_2O do solo e SIPA ainda está em crescente desenvolvimento no Brasil e resultados divergentes têm sido relatados. A interação dos componentes, lavoura, pecuária e floresta, seus diferentes manejos nas diferentes regiões do país podem trazer respostas distintas na produção de N_2O no solo, devido principalmente aos efeitos da adubação nitrogenada, do pisoteio animal e do sombreamento pelas árvores. O trabalho experimental foi conduzido no NITA em Pinhais – PR, com avaliação dos tratamentos: lavoura, pecuária, integração lavoura pecuária, integração pecuária floresta e integração lavoura pecuária floresta. O período de dois anos de avaliação foi dividido em quatro ciclos de cultivo: verão-1, inverno-1, verão-2 e inverno-2. As amostras de ar foram coletas pelo método da câmara estática fechada e analisadas através de cromatografia gasosa. Parâmetros de solo também foram determinados durante as avaliações. A pecuária teve a maior emissão acumulada de N_2O ($11,75 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e a maior PPA média (70,4 %). A elevada PPA média da pecuária pode ter ocorrido devido ao adensamento da camada superficial do solo, através de uma tendência de diminuição da porosidade total e da macroporosidade, pelo pisoteio animal. Os sistemas de uso do solo não afetaram as emissões de CH_4 , o qual foi consumido no solo. Entre os ciclos de cultivo, no verão-2, a maior PPA média (71,4 %) ocasionou a maior emissão acumulada de N_2O ($9,79 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$) e menor consumo de CH_4 ($-0,40 \text{ C-CH}_4 \text{ ha}^{-1}$). O contrário foi verificado no inverno-2, com menores PPA média (57,3 %) e emissão acumulada de N_2O ($0,64 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$) e maior consumo de CH_4 ($-0,90 \text{ C-CH}_4 \text{ ha}^{-1}$). A oscilação da PPA entre os ciclos de cultivo foi devido a sazonalidade da precipitação pluviométrica. Como conclusão, os sistemas lavoura pecuária floresta, pecuária floresta, lavoura pecuária são capazes de mitigar as emissões de N_2O em relação a pecuária, apesar de terem emissões semelhantes a lavoura. A elevada PPA do solo favorece a desnitrificação na pecuária propiciando maior emissão de N_2O . E, a sazonalidade da precipitação pluviométrica entre os ciclos de cultivo é determinante na magnitude das emissões de CH_4 e principalmente N_2O . Como conclusão geral, os resultados do estudo experimental reforçaram os resultados encontrados na literatura, mostrando o potencial de mitigação de emissão de N_2O e CH_4 , a partir do solo, pelos sistemas integrados.

Palavras-chave: Óxido nitroso. Metano. Integração lavoura pecuária. Porosidade preenchida por água do solo. Precipitação pluviométrica.

ABSTRACT

The increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, probably due to human activity, has caused climate change and has become one of humanity's main current challenges. Due to its participation in Brazilian emissions, the agricultural sector is seeking alternatives for a sustainable intensification of production, such as integrated crop-livestock systems (ICLS). In this context, the objective of this work was to expand the discussion and evaluate the performance of the ICLS in the mitigation of the emissions of nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4) from the soil, through a literature review on soil N_2O emissions in ICLS and a field experiment. The research relating soil N_2O emission and ICLS is still under development in Brazil and divergent results have been reported. The integration of crop, livestock and forest components and their different management can bring different responses to the biological processes of N_2O production in the soil, mainly due to the effects of nitrogen fertilization, animal trampling and tree shading. The field experiment was conducted in the NITA experiment in Pinhais - PR, with evaluation of the treatments: continuous crop, livestock, integrated crop-livestock, integrated livestock-forest and integrated crop-livestock-forest. The two-year evaluation period was divided into four seasons: summer-1, winter-1, summer-2 and winter-2. The air samples were collected by the closed static chamber method and analyzed by gas chromatography. Soil parameters were also determined during the evaluations. Livestock had the highest cumulative emission of N_2O ($11.75 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) and the highest weighted average WFPS (70.4%). The elevated weighted average WFPS could have occurred due to the densification of the soil superficial layer, through the tendency of reductions in total porosity and macroporosity, by animal trampling. The soil use systems did not affect the cumulative emission of CH_4 , which was consumed in the soil. Among seasons, the highest WFPS (71.4%) in summer-2 caused the highest cumulative emission of N_2O ($9.79 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$), the lowest CH_4 consumption ($-0.40 \text{ kg CH}_4\text{-C ha}^{-1}$). The contrary was verified in winter-2, with the lowest WFPS (57.3%) and cumulative emission of N_2O ($0.64 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$) and the highest CH_4 consumption ($-0.90 \text{ kg CH}_4\text{-C ha}^{-1}$). The oscillation of WFPS between seasons was due to the rainfall seasonality. As a conclusion, integrated crop-livestock-forest, integrated livestock-forest, integrated crop-livestock systems are able to mitigate N_2O and CH_4 emissions in relation to livestock, although they had similar emissions to cropland. The high WFPS of the soil in livestock favors denitrification providing greater N_2O emission in this system. And, the seasonality of the rainfall between seasons is determinant in the magnitude of emissions of CH_4 and mainly N_2O . As a general conclusion, the results of the experimental study reinforced the results found in the literature, showing the potential mitigation of N_2O and CH_4 emission from the soil, by the integrated systems.

Keywords: Nitrous oxide. Methane. Integrated crop-livestock. Water-filled pore space. Rainfall.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS CULTIVOS, PASTEJOS, ADUBAÇÕES E SESSÕES DE COLETA DE AR, DE SETEMBRO DE 2016 A SETEMBRO DE 2018, NOS TRATAMENTOS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).	44
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – EMISSÕES DE N ₂ O DOS SISTEMAS DE USO DO SOLO NOS EXPERIMENTOS DE SIPA NO BRASIL.	27
GRÁFICO 2 – EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO (A) E METANO (B) DE SETEMBRO DE 2016 A SETEMBRO DE 2018 PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).	49
GRÁFICO 3 – POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA (A) E TEMPERATURA DO SOLO (B) DE SETEMBRO DE 2016 A SETEMBRO DE 2018 PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).	52
GRÁFICO 4 – CONCENTRAÇÃO DE AMÔNIO (A) E NITRATO (B) NO SOLO DE SETEMBRO DE 2016 A SETEMBRO DE 2018 PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).	55
GRÁFICO 5 - PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DIÁRIA (A) E TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DO AR (B) E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MENSAL (C) DURANTE O PERÍODO DE ESTUDO, SETEMBRO DE 2016 A SETEMBRO DE 2018.	57
GRÁFICO 6 - REGRESSÃO ENTRE EMISSÃO DE N ₂ O ACUMULADA E POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA DO SOLO MÉDIA	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS EXPERIMENTOS DE EMISSÃO DE N ₂ O EM SIPA NO BRASIL.	28
TABELA 2 – HISTÓRICO DE CULTIVOS DA ÁREA EXPERIMENTAL NO PERÍODO DE 2011 A 2018, NO INVERNO E VERÃO, PARA OS TRATAMENTOS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).	43
TABELA 3 – EMISSÕES ACUMULADAS DE N ₂ O E CH ₄ E FATOR DE EMISSÃO DE N ₂ O PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).	50
TABELA 4 – POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA DO SOLO MÉDIA E TEMPERATURA DO SOLO MÉDIA PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).	53
TABELA 5 - ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).	54
TABELA 6 – CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO INORGÂNICO MÉDIA PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).	56
TABELA 7 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO COM COEFICIENTES DE PEARSON ENTRE EMISSÕES E ATRIBUTOS DO SOLO.	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	14
2 CAPÍTULO I: PANORAMA DA EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO, A PARTIR DO SOLO, EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO BRASIL: REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 RESUMO.....	16
2.2 ABSTRACT	17
2.3 EMISSÃO DE N ₂ O DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA.....	17
2.4 SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA	18
2.5 PRODUÇÃO DE N ₂ O A PARTIR DO SOLO	19
2.5.1 Porosidade preenchida por água	20
2.6 EMISSÃO DE N ₂ O, A PARTIR DO SOLO, EM SIPA NO BRASIL	21
2.6.1 Componente Lavoura	22
2.6.2 Componente Pecuária	24
2.6.3 Componente Floresta	25
2.7 CONCLUSÃO.....	31
2.8 REFERÊNCIAS	31
3 CAPÍTULO II: EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO, A PARTIR DO SOLO, EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO PARANÁ.....	37
3.1 RESUMO.....	37
3.2 ABSTRACT	38
3.3 INTRODUÇÃO	39
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.4.1 Descrição da área experimental.....	41
3.4.2 Determinação das emissões de N ₂ O e CH ₄ a partir do solo	45
3.4.2.1 Adubações nitrogenadas	46
3.4.3 Parâmetros de solo e meteorológicos	46
3.4.4 Análise estatística	47
3.5 RESULTADOS	48
3.5.1 Emissão de N ₂ O	48
3.5.2 Emissão de CH ₄	48
3.5.3 Fator de emissão de N ₂ O	50

3.5.4 Parâmetros de solo e meteorológicos	51
3.5.4.1 Porosidade preenchida por água	51
3.5.4.2 Temperatura do solo.....	51
3.5.4.3 Atributos físicos do solo	53
3.5.4.4 Concentração de NH_4^+ e NO_3^-	54
3.5.4.5 Precipitação pluviométrica e temperatura do ar	56
3.6 DISCUSSÃO	58
3.6.1 Sistemas integrados e as emissões de N_2O	58
3.6.2 Consumo de CH_4 no solo em SIPA	63
3.6.3 Comportamento sazonal nas emissões de N_2O e CH_4	63
3.7 CONCLUSÕES	66
3.8 REFERÊNCIAS	66
4 CONCLUSÃO GERAL.....	74
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6 REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO GERAL

O aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera tem provocado mudanças climáticas globais como, aumento da temperatura média da superfície global, derretimento de calotas polares e elevação no nível dos mares, com impactos importantes aos ecossistemas (IPCC, 2014). No quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, o IPCC afirma com 95 % de certeza, que a ação antrópica é a principal causa do aquecimento global (IPCC, 2014).

Os principais GEE são dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), com potenciais de aquecimento global para um horizonte de 100 anos, de 1, 28 e 265, respectivamente (IPCC, 2014). O N_2O é produzido no solo principalmente por processos biológicos de nitrificação e desnitrificação, os quais ocorrem simultaneamente em diferentes microsítios aeróbicos e anaeróbicos, respectivamente (ZHU-BARKER; STEENWERTH, 2018). O CH_4 pode ser produzido através da degradação anaeróbica dos compostos orgânicos no solo, mas, o consumo através da sua oxidação, é o processo mais frequente nos solos agrícolas (SAGGAR et al., 2008). As condições de umidade, aeração e disponibilidade de carbono e nitrogênio do solo, estão relacionadas aos processos de produção de N_2O e CH_4 , as quais são influenciadas pelos manejos adotados nos sistemas agrícolas.

O setor agropecuário nacional tem uma grande responsabilidade entre as atividades emissoras de GEE, pois contribui com 35 % das emissões nacionais, das quais 74 % do CH_4 e 84 % do N_2O são provenientes da agropecuária (MCTI, 2016). A crescente demanda por alimentos e sustentabilidade ambiental exigem mudanças nos sistemas de produção, e nesse contexto, os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) tem ganhado destaque como uma alternativa.

A complexidade trazida aos sistemas com a integração entre os componentes, lavoura, pecuária e floresta pode gerar diferentes respostas aos processos biológicos de produção de N_2O e CH_4 do solo, devido principalmente aos efeitos da adubação nitrogenada, do pisoteio animal e do sombreamento pelas árvores, como tem mostrado a pesquisa científica, em desenvolvimento recente no país. Na literatura, diferentes resultados têm sido relatados, entre os quais, diminuição da emissão de N_2O em sistema de integração lavoura pecuária floresta (PERGHER, 2014; CARVALHO et al., 2017), elevação da emissão de N_2O em

sistema de integração lavoura pecuária (PIVA et al., 2014), e emissões semelhantes entre os sistemas (CARVALHO et al., 2014b; SATO et al., 2016).

Neste contexto, o presente trabalho tem como hipótese geral de que os sistemas integrados são capazes de mitigar as emissões em relação a pecuária e a lavoura, devido a sua maior complexidade de fatores. E como objetivos gerais, ampliar a discussão, através de dados da literatura, sobre a capacidade dos sistemas integrados de produção agropecuária em mitigar as emissões de óxido nitroso. E também, avaliar experimentalmente o potencial de mitigação das emissões de óxido nitroso e metano, a partir do solo, dos sistemas integrados de produção agropecuária em dois anos.

2 CAPÍTULO I: PANORAMA DA EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO, A PARTIR DO SOLO, EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO BRASIL: REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RESUMO

O objetivo desta revisão de literatura é ampliar a discussão sobre o potencial de mitigação das emissões de óxido nitroso (N_2O), a partir do solo, dos sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA). O aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, provavelmente por atividade antrópica, tem provocado mudanças climáticas e se tornou um dos principais desafios atuais da humanidade. O N_2O tem um potencial de aquecimento 265 vezes maior do que o dióxido de carbono. Sua produção no solo ocorre através de processos biológicos de nitrificação e desnitrificação. Entre os principais fatores que influenciam na produção de N_2O , a porosidade preenchida por água (PPA) é o principal, pois relaciona a umidade e o espaço poroso do solo. Em solos com PPA acima de 60 % há um predomínio de desnitrificação, enquanto que em solos com PPA abaixo de 60 %, a desnitrificação por nitrificantes é o processo mais influente. O setor agropecuário é responsável por mais de 80 % das emissões de N_2O do Brasil. Os SIPA surgem como uma alternativa para aliar o aumento da produtividade e a sustentabilidade ambiental. A integração dos componentes lavoura, pecuária e floresta pode trazer diferentes respostas aos processos biológicos de produção de N_2O . Dentro disso, foram analisados oito trabalhos científicos relacionados a emissão de N_2O em SIPA no Brasil e discutidos os principais fatores que contribuíram para as emissões. Dentro do componente lavoura dos SIPA, a fertilização nitrogenada é a principal atividade responsável pela emissão de N_2O , pois o aumento da disponibilidade de nitrogênio inorgânico no solo estimula a atividade microbiana e os processos de nitrificação e desnitrificação. No componente pecuária, o pastejo animal pode provocar adensamento da camada superficial do solo através do pisoteio, propiciando condições para a elevação da PPA do solo e a emissão de N_2O , devido a maior quantidade de microsítios anaeróbicos no solo. O componente floresta promove alterações no microclima, com redução da radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar. O sombreamento proporcionado pelas linhas de árvores em SIPA pode diminuir a produção de biomassa e a taxa de cobertura solo, diminuindo a umidade da camada superficial do solo. Com a diminuição da PPA do solo, pode haver menor emissão de N_2O a partir do solo. Como conclusão, há um potencial de mitigação das emissões de N_2O a partir do solo em SIPA como relatado na literatura, mas as informações ainda são incipientes e divergentes, o que torna necessário a ampliação das pesquisas sobre emissão de N_2O do solo em sistemas integrados para que esse potencial possa ser melhor compreendido.

Palavras-chave: Lavoura. Pecuária. Floresta. PPA. Atividade microbiana.

2.2 ABSTRACT

The objective of this literature review is to expand the discussion about the potential for mitigation of nitrous oxide (N_2O) emissions, from the soil, in integrated crop-livestock systems (ICLS). The increase in the concentration of greenhouse gases in atmosphere, probably due to human activity, has caused climate change and has become one of humanity's main current challenges. The N_2O has a warming potential 265 times greater than carbon dioxide. N_2O production in the soil occurs through biological processes of nitrification and denitrification. Among the main factors that influence N_2O production, water-filled pore space (WFPS) is the main one, as it relates to soil moisture and pore space. In soils with WFPS above 60 % there is a predominance of denitrification, while in soils with WFPS below 60 % nitrifier denitrification is the most influential process. The agriculture and livestock sectors account for more than 80 % of Brazil's N_2O emissions. The ICLS has become an alternative to ally increasing productivity and environmental sustainability. The integration of crop, livestock and forest components can bring different responses to the biological processes of N_2O production. Because of that, eight scientific papers related to N_2O emission in ICLS in Brazil were analyzed and the main factors that contribute to the emissions were discussed. In the crop component of the ICLS, nitrogen fertilization is the main activity responsible for the N_2O emission, since the increase of the inorganic N availability in the soil stimulates the microbial activity and the nitrification and denitrification processes. In the livestock component, animal grazing may cause soil surface layer densification through trampling, providing conditions for soil WFPS elevation and N_2O emission, due to the greater amount of anaerobic microsites in the soil. The forest component promotes changes in the microclimate, with reduction of solar radiation, wind speed, temperature and humidity of the air. The shading provided by the tree lines in ICLS can reduce the biomass production and the soil cover rate, decreasing the moisture of the soil surface layer. With the decrease of soil WFPS, there may be less emission of N_2O from the soil. In conclusion, there is a potential for mitigation of N_2O emissions from soil in ICLS, as reported in the literature, but the information is still incipient and divergent, which makes it necessary to expand the research on soil N_2O emission in integrated systems for that this potential can be better understood.

Keywords: Crop. Livestock. Forest. Water-filled pore space. Microbial activity.

2.3 EMISSÃO DE N_2O DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA

As emissões brasileiras foram estimadas em 1,3 Gt CO_2 eq, no ano de 2010 (MCTI, 2016), colocando o Brasil entre os principais países emissores de gases de efeito estufa (GEE). Os principais GEE, que representam aproximadamente 90 % das emissões antrópicas nacionais, são dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e N_2O , e estes possuem potencial de aquecimento global de 1, 28 e 265, respectivamente (IPCC, 2014).

Considerando a emissão por setores, em 2010, a agropecuária representou 35 % das emissões nacionais, seguida pelo setor de energia (27 %) e pelo setor de uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (26 %). Os demais setores, de processos industriais e tratamento de resíduos, participaram com 7 % e 5 % (MCTI, 2016).

Em termos de N_2O , a agropecuária é responsável por 84 % das emissões brasileiras, provenientes principalmente da deposição de dejetos de animais em pastagem (30,4 %) e também das práticas de fertilização do solo (6,4 %) (MCTI, 2016). O IPCC (2006) estima um índice de perda de N via emissão de N_2O de 1 % (faixa de incerteza entre 0,3 % e 3 %) em relação ao N adicionado via fertilizantes minerais ou orgânicos e mineralização de N no solo, proveniente de resíduos vegetais.

2.4 SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) apresentam-se como uma alternativa para a intensificação sustentável (FAO, 2010; CARVALHO et al., 2014a). São caracterizados como sistemas planejados que envolvem interações da produção animal, agrícola e florestal, em rotação ou sucessão (BALBINO et al., 2011; MORAES et al., 2014). A busca por sinergismo e propriedades emergentes através das interações dos compartimentos solo-planta-animal-atmosfera é o diferencial dos SIPA, promovendo aumento da diversidade e da complexidade do sistema (MORAES et al., 2014).

Estima-se que cerca de 11,5 milhões ha^{-1} sejam cultivados com SIPA no Brasil com uma expansão de área de 10 milhões ha^{-1} , entre os anos de 2005 e 2015 (EMBRAPA, 2016). Dentro disso e considerando a importância da produção agropecuária no Brasil, a crescente expansão dos SIPA nos diferentes biomas tem trazido uma diversidade de arranjos, espaciais e temporais, com combinações de espécies, animais e vegetais (FAO, 2010; BALBINO et al., 2011; MORAES et al., 2014).

O solo é tido como o compartimento centralizador dos processos, que captura a ação dos demais compartimentos, chamado de “memória do sistema” por Anghinoni et al. (2013). Portanto, os sistemas integrados são capazes de influenciar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, e o manejo é o fator

determinante para que as alterações sejam benéficas ou não ao solo (CARVALHO et al., 2010; CARVALHO et al., 2018). Boeni et al. (2014) relatam a capacidade dos SIPA elevarem a concentração de C no solo, devido a elevada adição de biomassa pela pastagem. Mas estes podem atuar como fonte ou dreno de carbono (C) atmosférico, como relatado no estudo de Silva et al. (2014), no qual sob pastejo moderado o solo sequestrou C, e em alta intensidade de pastejo o solo foi fonte de C. A inclusão dos animais na pastagem favoreceram a biomassa microbiana no estudo de Silva et al. (2015). O pastejo moderado em SIPA promoveu maior ciclagem de nutrientes no estudo de Assmann et al. (2017) e não reduziu a qualidade física do solo, pelo pisoteio animal, após oito anos de integração lavoura-pecuária no estudo de Moreira et al. (2012). Com base nisso, em alguns estudos, como relatado por Carvalho et al. (2017) e Pergher (2014), os SIPA apresentam potencial de mitigação das emissões de GEE.

2.5 PRODUÇÃO DE N_2O A PARTIR DO SOLO

A produção de N_2O no solo ocorre principalmente pelos processos biológicos de nitrificação e desnitrificação. A nitrificação é a oxidação do amônio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) e ocorre em duas etapas, a oxidação da amônia (NH_3) a nitrito (NO_2^-); e a oxidação do NO_2^- a NO_3^- . Durante a primeira etapa da nitrificação, oxidação da NH_3 a hidroxilamina (NH_2OH) e finalmente a NO_2^- , o N_2O pode ser formado em algumas vias conhecidas como nitrificação por nitrificantes, desnitrificação por nitrificantes e desnitrificação acoplada a nitrificação (WRAGE et al., 2001; ZHU et al., 2013; ZHU-BARKER; STEENWERTH, 2018), as quais também podem ser chamadas na literatura de vias de oxidação da amônia (ZHU et al., 2013). Entre estas vias, a desnitrificação por nitrificantes é o processo mais representativo de produção de N_2O (ZHU et al., 2013). Os microrganismos nitrificantes, oxidantes de amônia, após oxidarem NH_3 a NO_2^- reduzem este NO_2^- a N_2O em condições de diminuição de O_2 no ambiente (WRAGE et al., 2001; WRAGE-MÖNNIG et al., 2018).

Enquanto que a desnitrificação é um processo anaeróbico de redução do NO_3^- a N_2 , no qual bactérias heterotróficas usam NO_3^- ou NO_2^- comoceptor de elétron alternativo ao O_2 para a decomposição de compostos orgânicos, e o N_2O é um dos subprodutos intermediários da desnitrificação (GREGORICH et al., 2015; ZHU-BARKER; STEENWERTH, 2018).

Os principais fatores que influenciam a produção de N_2O no solo são disponibilidade de nitrogênio (N) (BOUWMAN et al., 2002), disponibilidade de oxigênio (BOLLMANN; CONRAD, 1998; ZHU et al., 2013), umidade do solo (BATEMAN; BAGGS, 2005; RUSER et al., 2006), além de disponibilidade de carbono orgânico no solo (CASTALDELLI et al., 2019).

2.5.1 Porosidade preenchida por água

A porosidade preenchida por água (PPA) do solo é um dos principais fatores relacionados a produção de N_2O , pois expressa a relação entre a umidade gravimétrica e o espaço poroso do solo. Sua determinação é realizada através da equação:

$$PPA = \frac{D_s \times U_g}{\left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right)} \times 100$$

Onde, PPA é porosidade preenchida por água (%), U_g é umidade gravimétrica ($Mg^{-3} Mg^{-3}$), D_s é densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e D_p é densidade de partículas ($Mg m^{-3}$).

A porcentagem de PPA do solo pode informar a atuação dos processos de produção de N_2O , contudo, estes ocorrem simultaneamente no solo, em diferentes microsítios (BATEMAN; BAGGS, 2005; ZHU-BARKER; STEENWERTH, 2018).

Em solos com PPA abaixo de 60 % há um predomínio dos processos de produção de N_2O via oxidação da amônia, principalmente desnitrificação por nitrificantes, devido a maior aeração do solo (WRAGE-MÖNNIG et al., 2018). Bateman e Baggs (2005) encontraram que a desnitrificação por nitrificantes foi responsável por aproximadamente 70 % da produção de N_2O em solo com PPA de 35 e 50 %, e responsável por 80 % do N_2O produzido em solo com PPA de 60 %.

Enquanto que, em solos com PPA acima de 70 % pode haver uma predominância de microsítios anaeróbicos no solo, favorecendo a desnitrificação (BATEMAN; BAGGS, 2005). Em seu estudo, Well et al. (2006) encontraram que a desnitrificação foi a principal fonte de N_2O em solos com PPA de 75 e 85 %. Bateman e Baggs (2005) relataram que 100 % do N_2O produzido em solo com PPA

de 70 % foi proveniente do processo de desnitrificação. Contudo, em condições de umidade do solo próximo a saturação a produção de N_2O é desfavorecida e a desnitrificação é completa, produzindo N_2 (ZHU-BARKER; STEENWERTH, 2018).

Entretanto, em solos com PPA próximas a 20 % pode haver limitação de substrato e disponibilidade de água, reduzindo ao mínimo a atividade microbiana e consequentemente a produção de N_2O (BATEMAN; BAGGS, 2005). A elevação da umidade do solo, após um período de baixa umidade, provoca uma reativação da comunidade microbiana, elevando rapidamente os fluxos de N_2O e CO_2 , como relatado no estudo de Bergstermann et al. (2011), no qual o solo pré-seco, PPA de 25 % para 85 %, emitiu 1,6 vezes mais N_2O do que o solo pré-úmido, PPA 75 % para 85 %. Além disso, a produção de N_2O em condições de elevada PPA, acima de 70 %, apresenta maior amplitude do que em menores umidades do solo (BOLLMANN; CONRAD, 1998; KHALIL et al., 2005; WELL et al., 2006). Em seu estudo, Wu et al. (2017) relataram pico de emissão de N_2O 10 vezes maior para solo com PPA de 80 % em relação ao solo com 65 % de PPA. Bateman e Baggs (2005) encontraram em seu trabalho, em condições laboratoriais, que o solo com PPA de 70 % emitiu 16 vezes mais do que o solo com PPA de 20 % e seis vezes mais do que o solo com PPA de 60 %.

2.6 EMISSÃO DE N_2O , A PARTIR DO SOLO, EM SIPA NO BRASIL

A pesquisa científica relacionando emissão de GEE, a partir do solo, em SIPA é recente e está em desenvolvimento no Brasil, devido a crescente expansão da utilização dos sistemas integrados e a demanda por sustentabilidade ambiental. Para esta análise foram utilizados oito trabalhos científicos, sendo sete artigos buscados na base de dados *Web of Science*, e uma dissertação, relacionados a emissão de N_2O em SIPA no Brasil (TABELA 1 e GRÁFICO 1).

Os diversos resultados relatados nestes trabalhos podem estar relacionados com as diferentes respostas da interação entre os componentes, lavoura, pecuária e floresta e dos manejos adotados nos sistemas integrados em cada região do país. Os solos dos locais dos estudos são predominantemente Latossolos, com textura argilosa, sendo que seis trabalhos foram realizados na região Centro-Oeste e dois no Sul do país. Nos diferentes climas, a precipitação pluviométrica anual está acima de 1400 mm, distribuída ao longo do ano (Cfb e Cwa) ou em estações chuvosas

(Aw). Na região Sul, os sistemas integrados apresentaram rotação de culturas anuais, com pastejo no inverno, enquanto que na região Centro-Oeste, houve um predomínio de sistemas com cultivo de milho ou sorgo consorciado com braquiária seguido de pastejo após a colheita da cultura de grãos.

Entre os fatores responsáveis pela emissão de N_2O , a adubação nitrogenada influenciou de maneira geral o aumento das emissões de N_2O , a PPA do solo foi o parâmetro de maior relação com as emissões e a precipitação pluviométrica exerceu influencia sazonal nos resultados.

Os SIPA foram capazes de mitigar as emissões de N_2O nos trabalhos de Pergher (2014), Salton et al. (2014), Nogueira et al. (2016) e Carvalho et al. (2017). Contudo, tiveram emissões superiores nos trabalhos de Piva et al. (2014) e Correa et al. (2016), e não diferiram dos demais sistemas comparativos nos estudos de Carvalho et al. (2014b) e Sato et al. (2016).

Serão utilizadas as seguintes siglas para identificações dos sistemas de uso do solo: sistema de lavoura (Lav), sistema de pecuária (Pec), sistema de pastagem sem pastejo (PA), Integração lavoura pecuária (LP), integração lavoura pecuária floresta (LPF) (TABELA 1).

2.6.1 Componente Lavoura

A fertilização nitrogenada é a principal atividade responsável pela emissão de N_2O em sistemas agrícolas. O aumento da disponibilidade de N inorgânico no solo estimula a atividade dos microrganismos e os processos de nitrificação e desnitrificação, responsáveis pela produção de N_2O (BOUWMAN et al., 2002; ZHU-BARKER; STEENWERTH, 2018). Isso pode ser visto através do pico de emissão após a fertilização, como relatado no estudo de Sato et al. (2017), no qual houve um aumento de mais de cinco vezes no fluxo de N_2O , um dia após a adubação na cultura do sorgo (100 kg N ha^{-1}). Após três dias da adubação na cultura de milho (165 kg N ha^{-1}), Piva et al. (2014) relataram um aumento de sete vezes na emissão de N_2O .

A magnitude dos fluxos de N_2O está relacionada com as características da adubação, como dose e fonte de N adicionada, além de condições do solo e climáticas, como PPA e precipitação pluviométrica. Carvalho et al. (2017), encontraram maiores picos de emissão após a adubação em período de chuvas em

relação ao período de seca, no Cerrado, com mais de 50 % dos fluxos observados durante o período de aplicação de N no solo. Em estudo comparando aplicação de diferentes fontes de N mineral no solo, Zanatta et al. (2010) relataram aumento dos fluxos entre 4 a 400 vezes após três dias da adubação, com a maior emissão para fertilizantes com N em formas nítricas.

A maior emissão de N_2O em LP ($4,26 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) no estudo de Piva et al. (2014) pode também estar relacionada com a adubação (60 kg N ha^{-1}) realizada nesse sistema na pastagem de azevém, a qual não foi realizada na Lav ($1,26 \text{ N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). No estudo de Carvalho et al. (2014b), a emissão acumulada da LP ($2,00 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) não diferiu da emissão da Pec ($1,67 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), com braquiária em pastejo contínuo, e da Lav ($0,57 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), com sucessão soja e milho. Segundo os autores, a emissão da LP pode estar associada a elevada adubação N (130 kg N ha^{-1}) adicionada no cultivo do algodão, o qual foi cultivado na rotação bianual com soja, e consórcio de milho e braquiária (*B. ruziziensis*) pastejada.

Além da fertilização nitrogenada, a entrada de N através dos resíduos culturais também pode contribuir para a emissão de N_2O , como visto no estudo de Senbayram et al. (2018) analisando a emissão de N_2O em solo com diferentes adições de palhada de milho, no qual houve aumento linear da emissão com os níveis de palhada adicionados, nos primeiros dias de incubação. No estudo de Salton et al. (2014), a LP teve emissão inferior ($0,49 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$) em relação a Lav ($0,52 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$), durante o ciclo da soja. Os autores relacionam as emissões com a deposição de folhas senescentes no período de chuvas. Esse efeito também foi verificado por Pergher (2014), com o maior pico de emissão de N_2O durante o período de senescência da soja, devido a decomposição dos resíduos culturais de baixa relação C:N.

No estudo de Sato et al. (2017), o aumento da concentração de NH_4^+ e NO_3^- no solo ocorreu após a fertilização (100 kg N ha^{-1}) e após a semeadura do sorgo sobre palhada de soja, elevando a emissão de N_2O no período. Neste trabalho, a LP recebeu o consórcio entre sorgo e braquiária (*B. brizantha* cv. Piatã) seguido de braquiária com pastejo contínuo, e a Lav recebeu consórcio de sorgo e braquiária, pousio, soja e milho, mas as emissões de N_2O foram similares entre os sistemas LP ($1,52 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e Lav ($1,90 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Os autores afirmam que

a decomposição de diferentes resíduos culturais no ciclo de rotação, além da adubação nitrogenada, pode interferir nas emissões de N_2O do solo.

2.6.2 Componente Pecuária

A presença dos animais em pastejo pode influenciar a estrutura do solo através da pressão exercida pelo casco do animal, reduzindo o espaço poroso e provocando o adensamento da camada superficial do solo, o que pode favorecer a produção de N_2O nos microsítios anaeróbicos do solo. A compactação da camada superficial do solo provocada pelo pastejo, com alta intensidade, foi verificada nos estudos de Cecagno et al. (2016) e Debiasi et al. (2012). O maior adensamento da camada superficial foi verificado no estudo de Conte et al. (2011), através do aumento da resistência mecânica do solo à penetração em sistema de LP de sete anos, apesar disso, os autores também relatam aumento do diâmetro médio ponderado dos agregados do solo nas áreas pastejadas. Já, a diminuição na porosidade total e macroporosidade do solo, e redução da taxa de infiltração de água foi verificada por Bonetti et al. (2019).

Entretanto, esse efeito do pisoteio animal pode ser amenizado na rotação com a cultura agrícola, como relatado no estudo de Ambus et al. (2018), no qual, após rotação com um ciclo de lavoura, o solo sob LP foi capaz de se regenerar através da diminuição do efeito da compactação causada pelo pisoteio animal durante o ciclo de pastagem. Bonetti et al. (2019) também relatam esse efeito em seu estudo, no qual houve diminuição da densidade e aumento na porosidade do solo após o ciclo da lavoura em LP. Após oito anos de LP, Moreira et al. (2012) afirmam que apesar das alterações provocadas ao solo pelo pisoteio, não houve redução na qualidade física do solo.

O principal efeito do pastejo, com alta intensidade, segundo Ambus et al. (2018) é a redução repentina na condutividade hidráulica e na permeabilidade ao ar do solo na camada mais superficial, reduzindo o espaço poroso. Este efeito de adensamento pode alterar a PPA do solo e a emissão de N_2O , aumentando o número de microsítios anaeróbicos, favorecendo a desnitrificação. Balaine et al. (2013) observaram aumento da emissão de N_2O em solo com maior densidade, resultado da compactação que aumentou a porcentagem de microporos, diminuindo a difusividade relativa do gás no solo.

Corroborando, o estudo de Piva et al. (2014), o sistema LP teve maior emissão de N_2O ($4,26 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em comparação a Lav ($1,26 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Apesar de não encontrar diferença entre densidade, porosidade total, macro e microporosidade na camada de 0-5 cm, os autores afirmam que havia compactação do solo nos primeiros 2 cm e que esse adensamento da camada superficial do solo, provocado pelo pisoteio animal, pode ter contribuído na emissão da LP.

Enquanto que, Pergher (2014) afirma que o adensamento superficial do solo causado pelo pisoteio animal não afetou a emissão de N_2O em seu estudo, pois não houve consequente elevação da PPA do solo e as emissões foram semelhantes entre LP ($1,65 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e Lav ($1,89 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Segundo o autor, a PPA do solo foi semelhante entre os sistemas, pois apesar do adensamento da LP proporcionar maior PPA, a redução da cobertura do solo pelo pastejo favoreceu a perda de água por evaporação, contrário a Lav, com maior cobertura do solo sob aveia e azevém, mas com melhores condições físicas do solo. Sato et al. (2016) também não relataram o efeito da compactação do solo pelo pisoteio animal, fato este justificado pela presença de resíduos culturais protegendo a superfície do solo, e as emissões entre LP e Lav foram semelhantes.

A microporosidade do solo foi o principal fator que afetou a PPA e proporcionou a emissão de $1,6 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$, no estudo de Correa et al. (2016), no qual o sistema LP com pastejo rotacionado de braquiária, elevou a microporosidade (41 %), diminuiu a macroporosidade (11 %) e elevou a densidade do solo ($1,35 \text{ g cm}^{-3}$) na comparação com Cerrado nativo.

2.6.3 Componente Floresta

A presença das árvores em um sistema integrado causa mudanças no microclima do sub-bosque, reduzindo a radiação solar, a velocidade do vento, a temperatura e a umidade do ar (PEZZOPANE et al., 2015). E, a limitação da incidência de radiação fotossinteticamente ativa é a principal causa da redução da produção de matéria seca das pastagens em sistema integrado (KIRSCHNER et al., 2010; SANTOS et al., 2016; SOARES et al., 2016), o que pode influenciar na emissão de N_2O a partir do solo nesses sistemas.

Com a diminuição da interceptação luminosa, há uma redução na taxa de assimilação de CO₂ pelas plantas, as quais em resposta diminuem o perfilhamento e promovem a alongação do colmo, como encontrado por Pontes et al. (2018), avaliando sistemas integrados com pastagem de aveia e azevém e árvores de eucalipto e grevilea. Em condições de sombreamento acima de 30 % e até 6 m do renque de árvores, Paciullo et al. (2011) encontraram maior teor de proteína nas plantas, mas também, diminuição no perfilhamento, na massa seca e no acúmulo de forragem. Em seu estudo, Barro et al. (2008) também relataram que os níveis de sombreamentos, moderado e fraco, provocaram diminuição de 43 e 66 % do rendimento da pastagem de aveia e azevém em relação a pastagem em pleno sol.

Com a menor produção de biomassa das plantas e diminuição do perfilhamento, pode haver redução do índice de área foliar das plantas (BOSI et al., 2014; SANTOS et al., 2016). O sombreamento intenso reduziu a densidade de perfilhos e o índice de área foliar de plantas de braquiária no estudo de Paciullo et al. (2007). A redução da área foliar das plantas pode acarretar em menor taxa de cobertura do solo, deixando área de solo exposta, favorecendo a evaporação da água na camada superficial do solo. Além disso, a menor umidade da camada superficial do solo na linha de árvores com aumento gradativo até o centro da entrelinha é justificada, no estudo de Pezzopane et al. (2015), pela maior exploração radicular na linha de árvores, a qual promove maior remoção da umidade do solo em comparação com os pontos mais distantes.

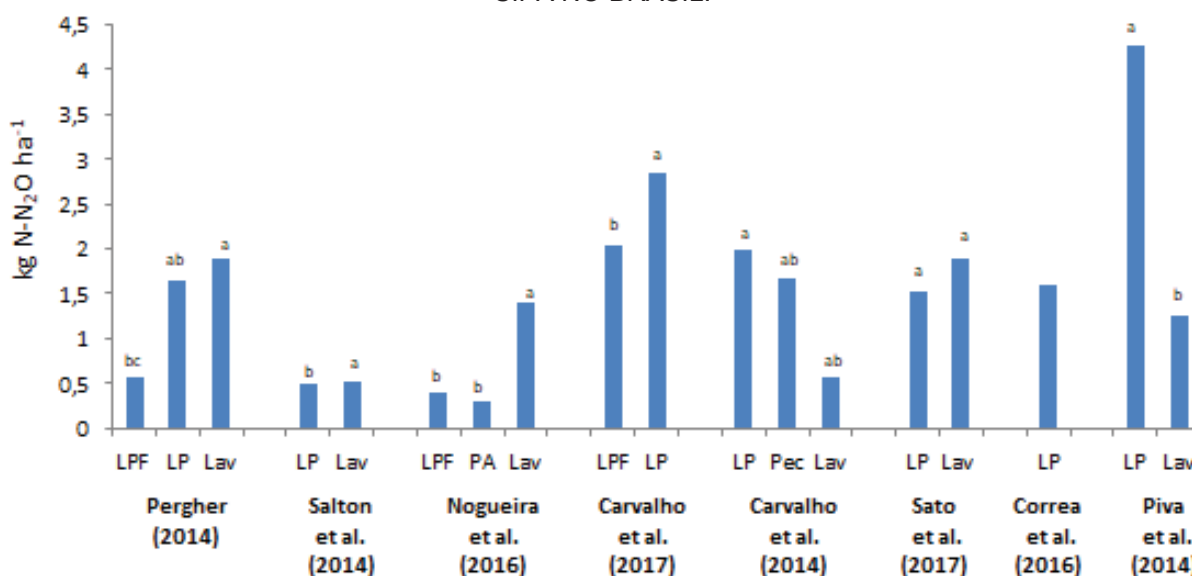
A possível menor umidade do solo em sistemas integrados com árvores, como relatado anteriormente, pode apresentar relação com a PPA e com a emissão de N₂O do solo. Esse efeito foi relatado por Pergher (2014), o qual afirma que a menor PPA do solo, decorrente da menor cobertura vegetal do solo em sistema de LPF, foi um dos fatores responsáveis pela redução das emissões neste sistema. Neste estudo, o sistema LPF teve emissão acumulada (0,57 kg N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹) três vezes menor do que a emissão do sistema lavoura (Lav) (1,89 kg N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹).

O sistema LPF também apresentou menores emissões (2,05 kg N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹) em relação a LP (2,84 kg N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹) no estudo de Carvalho et al. (2017), realizado no Cerrado. Apesar da PPA do solo não ser o fator responsável pela diferença entre os sistemas, esta foi a variável de melhor correlação com os fluxos. Os autores sugerem que a presença de compostos fenólicos na liteira do

eucalipto, causando a diminuição do carbono da biomassa microbiana pode ter provocado a diferença de emissão entre os sistemas.

A LPF também reduziu as emissões no estudo de Nogueira et al. (2016), com valores de 0,4 kg N-N₂O ha⁻¹ para LPF e 1,4 kg N-N₂O ha⁻¹ para Lav. Os autores não determinaram a PPA do solo, mas afirmam que a maior temperatura do solo na Lav pode ter sido responsável pela maior emissão, e que a precipitação pluvial, além da disponibilidade de N via adubação, são os principais fatores reguladores das emissões de N₂O identificados.

GRÁFICO 1 – EMISSÕES DE N₂O DOS SISTEMAS DE USO DO SOLO NOS EXPERIMENTOS DE SIPA NO BRASIL.



FONTE: O autor (2019).

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS EXPERIMENTOS DE EMISSÃO DE N₂O EM SIPA NO BRASIL.

(continuação)					
Referência	Características área experimental	Sistemas	Culturas durante a avaliação	Adubação N recebida	Emissão N ₂ O * Avaliação GEE
Piva et al. (2014)					
	Localidade	Castro - PR	LP	Milho silagem	165 kg N ha ⁻¹
	Solo	Latossolo Bruno		Azevém c/ pastejo rotativo	4,26 kg N-N ₂ O ha ⁻¹ ano ⁻¹
	Textura	Argilosa			a
	Clima	Cfb			Setembro 2008 a Setembro 2009
Prec. pluviométrica	1400 mm	Lav	Milho silagem	165 kg N ha ⁻¹	1,26 kg N-N ₂ O ha ⁻¹ ano ⁻¹
	Idade 4 anos		Azevém		b
Salton et al. (2014)					
	Localidade	Dourados - MS	LP	Soja	0,49 kg N-N ₂ O ha ⁻¹
	Solo	Latossolo			b
	Textura	Muito argilosa			Dezembro 2010 a Abril 2011
	Clima	Cwa		Soja	0,52 kg N-N ₂ O ha ⁻¹
Prec. pluviométrica	-	Lav			a
	Idade	15 anos			
Correa et al. (2016)					
	Localidade	Santo Antonio de Goiás - GO	LP	Braquiária c/ pastejo rotativo	45+100 kg N ha ⁻¹
	Solo	Latossolo Vermelho			1,6 kg N-N ₂ O ha ⁻¹
	Textura	Argilosa			Fevereiro 2013 a Setembro 2013
	Clima	Aw			
Prec. pluviométrica	1500 mm	Cerrado	Vegetação nativa		0 kg N-N ₂ O ha ⁻¹
	Idade	13 anos			

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS EXPERIMENTOS DE EMISSÃO DE N₂O EM SIPA NO BRASIL.

Referência	Características área experimental			Sistemas	Culturas durante a avaliação	Adubação N recebida	Emissão N ₂ O *	Avaliação GEE (conclusão)	
Nogueira et al. (2016)									
	Localidade	Sinop - MT	LPF	Soja	Milho+ Braquiária	300 kg N ha ⁻¹	0,4 kg N-N ₂ O ha ⁻¹	b	
	Solo	Latossolo vermelho							
	Textura	Argilosa							
	Clima	Aw							
Prec. pluviométrica	2550 mm	PA	Braquiária s/ pastejo			0,3 kg N-N ₂ O ha ⁻¹	b	Novembro 2013 a	
	Idade	2 anos	Lav	Soja		300 kg N ha ⁻¹	1,4 kg N-N ₂ O ha ⁻¹	a	Outubro 2014
Carvalho et al. (2017)									
	Localidade	Planaltina - DF	LPF	Sorgo+braquiária	Braquiária pastejada	30 kg N ha ⁻¹	2,05 kg N-N ₂ O ha ⁻¹ ano ⁻¹	b	
	Solo	Latossolo							
	Textura	Argilosa							
	Clima	Aw							
Prec. pluviométrica	1500-1800 mm	LP	Sorgo+braquiária			30 kg N ha ⁻¹	2,84 kg N-N ₂ O ha ⁻¹ ano ⁻¹	a	
	Idade	3 anos	Braquiária pastejada			90+60 kg N ha ⁻¹			
Sato et al. (2017)									
	Localidade	Planaltina - DF	LP	Sorgo+braquiária	Braquiária c/ pastejo contínuo	100 kg N ha ⁻¹	1,52 kg N-N ₂ O ha ⁻¹	a	
	Solo	Latossolo							
	Textura	Argilosa							
	Clima	Aw							
Prec. pluviométrica	1400-1600 mm	Lav	Sorgo+braquiária			100 kg N ha ⁻¹	1,90 kg N-N ₂ O ha ⁻¹	a	
	Idade	24 anos	Pousio						
			Soja/Milho						

FONTE: O autor (2019).

2.7 CONCLUSÃO

Como visto, há um potencial de mitigação das emissões de N₂O a partir do solo pelos SIPA, tornando os sistemas uma alternativa de intensificação sustentável aos atuais sistemas especializados e simplistas de produção. A integração lavoura pecuária floresta foi o sistema com o maior potencial de mitigação das emissões de N₂O considerando os estudos analisados.

No entanto, a interação entre os componentes, lavoura, pecuária e floresta traz diferentes respostas a produção de N₂O no solo, como visto nos diferentes estudos analisados, devido a diferença entre os manejos adotados para cada componente e em cada região do país.

Essa diferença de resposta pelos sistemas integrados e a sua importância de utilização no país, indica a necessidade de expansão dos estudos nessa linha de pesquisa, buscando avaliar os fatores e os manejos que afetam as emissões, e o potencial dos SIPA na mitigação das emissões de GEE.

2.8 REFERÊNCIAS

AMBUS, J. V.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; CARVALHO, P. C. F. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, v. 330, p. 232-243, 2018.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtrópico brasileiro. In: ARAÚJO, A. P.; AVELAR, B. J. R. (Eds.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: UFV, 2013. p. 13-28.

ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; DENARDIN, L. G. D.; NICHEL, G. D.; COSTA, S.; SILVA, R.; BALERINI, F.; CARVALHO, P. C. D.; FRANZLUEBBERS, A. J. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 21-33, 2017.

BALAINÉ, N.; CLOUGH, T. J.; BEARE, M. H.; THOMAS, S. M.; MEENKEN, E. D.; ROSS, J. G. Changes in relative gas diffusivity explain soil nitrous oxide flux dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 5, p. 1496-1505, 2013.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. D. O.; STONE, L. F. **Marco referencial integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2011.

BARRO, R. S.; SAIBRO, J. C. D.; MEDEIROS, R. B. D.; SILVA, J. L. S. D.; VARELLA, A. C. Rendimento de forragem e valor nutritivo de gramíneas anuais de estação fria submetidas a sombreamento por *Pinus elliottii* e ao sol pleno. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 10, p. 1721-1727, 2008.

BATEMAN, E. J.; BAGGS, E. M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. **Biology and Fertility of Soils**, v. 41, n. 6, p. 379-388, 2005.

BERGSTERMANN, A.; CÁRDENAS, L.; BOL, R.; GILLIAM, L.; GOULDING, K.; MEIJIDE, A.; SCHOLEFIELD, D.; VALLEJO, A.; WELL, R. Effect of antecedent soil moisture conditions on emissions and isotopologue distribution of N₂O during denitrification. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 2, p. 240-250, 2011.

BOENI, M.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; CONCEIÇÃO, P. C.; DICK, D. P.; KNICKER, H.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M. Organic matter composition in density fractions of cerrado ferralsols as revealed by CPMAS ¹³C NMR: Influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 80-86, 2014.

BOLLMANN, A.; CONRAD, R. Influence of O₂ availability on NO and N₂O release by nitrification and denitrification in soils. **Global Change Biology**, v. 4, n. 4, p. 387-396, 1998.

BONETTI, J. D. A.; ANGHINONI, I.; IVONIR GUBIANI, P.; CECAGNO, D.; DE MORAES, M. T. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 280-291, 2019.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; SENTELHAS, P. C.; NICODEMO, M. L. F. Produtividade e características biométricas do capim-braquiária em sistema silvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 6, p.449-456, 2014.

BOUWMAN, A. F.; BOUMANS, L. J. M.; BATJES, N. H. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, p. 6-1-6-13, 2002.

CARVALHO, A. M. D.; DE OLIVEIRA, W. R. D.; RAMOS, M. L. G.; COSER, T. R.; DE OLIVEIRA, A. D.; PULROLNIK, K.; SOUZA, K. W.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L. Soil N₂O fluxes in integrated production systems, continuous pasture and cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 69-83, 2017.

CARVALHO, P. C. D.; DE MORAES, A.; PONTES, L. D.; ANGHINONI, I.; SULC, R. M.; BATELLO, C. Definitions and terminologies for integrated crop-livestock system. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 1040-1046, 2014a.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; FRAZÃO, L. A.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 183, p. 167-175, 2014b.

CARVALHO, P. C. D.; ANGHINONI, I.; DE MORAES, A.; DE SOUZA, E. D.; SULC, R. M.; LANG, C. R.; FLORES, J. P. C.; LOPES, M. L. T.; DA SILVA, J. L. S.; CONTE, O.; WESP, C. D.; LEVIEN, R.; FONTANELI, R. S.; BAYER, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 88, n. 2, p. 259-273, 2010.

CARVALHO, P. C. D.; BARRO, R. S.; BARTH NETO, A.; NUNES, P. A. A.; MORAES, A.; ANGHINONI, I.; BREDEMEIER, C.; BAYER, C.; MARTINS, A. P.; KUNRATH, T. R.; SANTOS, D. T.; CARMONA, F. C.; BARROS, T.; SOUZA FILHO, W.; ALMEIDA, G. M.; CAETANO, L. A. M.; CECAGNO, D.; ARNUTI, F.; DENARDIN, L. G. O.; BONETTI, J. A.; TONI, C. A. G.; BORIN, J. B. M. Integrating the pastoral component in agricultural systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 47, 2018.

CASTALDELLI, G.; COLOMBANI, N.; SOANA, E.; VINCENZI, F.; FANO, E. A.; MASTROCICCO, M. Reactive nitrogen losses via denitrification assessed in saturated agricultural soils. **Geoderma**, v. 337, p. 91-98, 2019.

CECAGNO, D.; COSTA, S.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; MARTINS, A. P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; BALERINI, F.; FINK, J. R.; CARVALHO, P. C. D. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 54-62, 2016.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D.; LEVIEN, R.; WESP, C. D. Evolution of soil physical attributes in an integrated crop-livestock system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1301-1309, 2011.

CORREA, R. S.; MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CARVALHO, G. D.; PEREIRA, A. C. C.; MEDEIROS, J. C. Fluxos de óxido nitroso e suas relações com atributos físicos e químicos do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1148-1155, 2016.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Soil physical attributes and soybean production in a crop-livestock integration system with *Brachiaria sp* and *Glycine max*. **Ciencia Rural**, v. 42, n. 7, p. 1180-1186, 2012.

EMBRAPA. **ILPF em números**. Sinop: EMBRAPA, 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1064859/ilpf-em-numeros>> Acesso em: 15 jan. 2019.

FAO. An international consultation on integrated crop livestock systems for development: The way forward for sustainable production intensification. **Integrated Crop Management**. 2010. v. 13, 64 p.

GREGORICH, E.; JANZEN H.; HELGASON, B.; ELLERT, B. Nitrogenous gas emissions from soils and greenhouse gas effects. In: SPARKS, D.L. (Ed). **Advances in Agronomy**. v.132. p. 39-74. 2015.

IPCC. **2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.** In: EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Published: IGES, Japan, 2006.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** CORE WRITING TEAM; PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (Eds.). Geneva: IPCC, 2014.151 p.

KHALIL, M. I.; BAGGS, E. M. CH₄ oxidation and N₂O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH₄ concentrations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 10, p. 1785-1794, 2005.

KIRCHNER, R.; SOARES, A. B.; SARTOR, L. R.; ADAMI, P. F.; MIGLIORINI, F.; FONSECA, L. Performance of hibernar forages under distinct brightness levels. **Revista Brasileira De Zootecnia**, v. 39, n. 11, p. 2371-2379, 2010.

MCTI. **Terceira comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima – Volume III.** Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. D. F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. D. A.; KUNRATH, T. R. Integrated crop–livestock systems in the brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014.

MOREIRA, W. H.; BETIOLI, E.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA, M. A. T.; FRANCO, H. H. S. Physical properties of an oxisol in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 389-400, 2012.

NOGUEIRA, A. K. S.; RODRIGUES, R. A. R.; SILVA, J. J. N.; BOTIN, A. A.; SILVEIRA, J. G.; MOMBACH, M. A.; ARMACOLO, N. M.; ROMEIRO, S. O. Fluxos de óxido nitroso em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p.1156-1162, 2016.

PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; FERNANDES, P. B.; MÜLLER, M. D.; PIRES, M. F. A.; FERNANDES, E. N.; XAVIER, D. F. Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1176-1183, 2011.

PERGHER, M. **Emissão de óxido nitroso e metano do solo e de dejetos bovinos em sistemas integrados de produção com ILP e ILPF.** 57 f. Dissertação (Mestre em Ciência do Solo) – Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; NICODEMO, M. L. F.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G.; PARMEJIANI, R. S. Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. **Bragantia**, v. 74, n. 1, p. 110-119, 2015.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; DE MORAES, A.; TOMAZI, M.; PAULETTI, V.; BARTH, G.; PICCOLO, M. D. C. Soil gaseous N₂O and CH₄ emissions and carbon pool due to integrated crop-livestock in a subtropical ferralsol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 87-93, 2014.

PONTES, L. D.; BARRO, R. S.; SAVIAN, J. V.; BERNDT, A.; MOLETTA, J. L.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; BAYER, C.; CARVALHO, P. C. D. Performance and methane emissions by beef heifer grazing in temperate pastures and in integrated crop-livestock systems: The effect of shade and nitrogen fertilization. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 253, p. 90-97, 2018.

RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R. SCHMIDT, G.; BUEGGER, F.; MUNCH, J. C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 38, p. 263–274, 2006.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.

SANTOS, D. C.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; VILELA, L.; PULROLNIK, K.; BUFON, V. B.; FRANÇA, A. F. S. Forage dry mass accumulation and structural characteristics of Piatã grass in silvopastoral systems in the Brazilian Savannah. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 233, p. 16–24, 2016.

SATO, J. H.; CARVALHO, A. M.; FIGUEIREDO, C. C.; COSER, T. R.; SOUSA, T. R.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L. Nitrous oxide fluxes in a Brazilian clayey oxisol after 24 years of integrated crop-livestock management. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, p. 55-68, 2017.

SENBAYRAM, M.; WELL, R.; BOL, R.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L.; WI, D. Interaction of straw amendment and soil NO₃⁻ content controls fungal denitrification and denitrification product stoichiometry in a sandy soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 126, p. 204–212, 2018.

SILVA, A. S.; COLOZZI, A.; NAKATANI, A. S.; ALVES, S. J.; ANDRADE, D. D.; GUIMARAES, M. D. Microbial characteristics of soils under an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 40-48, 2015.

SILVA, F. D. D.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in southern brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 60-69, 2014.

SOARES, A. B.; BERNARDON, A.; AIOLFI, R. B. Forage yield, rate of CO₂ assimilation, and quality of temperate annual forage species grown under artificial shading conditions. **Ciência Rural**, v. 46, n. 6, p. 1064-1069, 2016.

WELL, R.; KURGANOVA, I.; DE GERENYU, V. L.; FLESSA, H. Isotopomer signatures of soil - emitted N_2O under different moisture conditions - a microcosm study with arable loess soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 38, n. 9, p. 2923-2933, 2006.

WRAGE, N.; VELTHOF, G. L.; VAN BEUSICHEM, M. L.; OENEMA, O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 33, p. 1723-1732, 2001.

WRAGE-MÖNNIG, N.; HORN, M. A.; WELL, R.; MÜLLER, C.; VELTHOF, G.; OENEMA, O. The role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide revisited. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 123, p. A3-A16, 2018.

WU, D.; CÁRDENAS, L. M.; CALVET, S.; BRÜGGEMANN, N.; LOICK, N.; LIU, S.; BOL, R. The effect of nitrification inhibitor on N_2O , NO and N_2 emissions under different soil moisture levels in a permanent grassland soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 113, p. 153-160, 2017.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; VIEIRA, F. C. B.; GOMES, J.; TOMAZI, M. Nitrous oxide and methane fluxes in south brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1653-1665, 2010.

ZHU, X.; BURGER, M.; DOANE, T. A.; HORWATH, W. R. Ammonia oxidation pathways and nitrifier denitrification are significant sources of N_2O and NO under low oxygen availability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 16, p. 6328, 2013.

ZHU-BARBER, X.; STEENWERTH, K. L. Nitrous oxide production from soils in the future: Processes, controls, and responses to climate change. In: HORWATH, W.; KUZUYAKOV, Y. (Eds). **Climate Change Impacts on Soil Processes and Ecosystem Properties**. Elsevier, 2018. p. 131-183.

3 CAPÍTULO II: EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO, A PARTIR DO SOLO, EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO PARANÁ

3.1 RESUMO

Os sistemas integrados de produção agropecuária são adotados no Brasil como uma alternativa para a intensificação sustentável da produção. Os objetivos deste trabalho foram avaliar a capacidade de sistemas integrados em mitigar emissões de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), a partir do solo, em relação aos sistemas lavoura e pecuária; bem como avaliar a influência da sazonalidade nas emissões, durante dois anos. O trabalho foi conduzido no experimento do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária, na Fazenda Canguiri em Pinhais – PR. Os tratamentos avaliados foram lavoura (milho e aveia preta), pecuária (pastagens de capim áries e aveia preta), integração lavoura pecuária (rotação com um ano de lavoura e três anos de pastagens), integração pecuária floresta (pastagens de capim áries e aveia preta entre linhas de eucalipto) e integração lavoura pecuária floresta (rotação com um ano de lavoura e três anos de pastagens entre linhas de eucalipto), dispostos em blocos ao acaso com três repetições. O período de dois anos de avaliação foi dividido em quatro ciclos de cultivo: verão-1, inverno-1, verão-2 e inverno-2. As amostras de ar foram coletadas pelo método da câmara estática fechada, com utilização de três e quatro câmaras por parcela. A concentração de N_2O e CH_4 foi realizada via cromatografia gasosa na Embrapa Florestas. Em cada coleta de ar também foram avaliados os parâmetros de solo na camada de 0-5 cm, temperatura, porosidade preenchida por água (PPA) e concentração de nitrato e amônio. Foram realizadas determinações de densidade (ao final de cada ciclo de cultivo), porosidade total, macro e microporosidade do solo ao final do inverno-2. Os dados foram submetidos a análise de variância (Teste F $p < 0,05$) e teste de médias (Tukey $p < 0,05$). A pecuária teve a maior emissão acumulada de N_2O ($11,75 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e a maior PPA média (70,4 %). A elevada PPA média da pecuária pode ter ocorrido devido ao adensamento da camada superficial do solo, através de uma tendência de diminuição da porosidade total e da macroporosidade, pelo pisoteio animal. Os sistemas de uso do solo não afetaram as emissões de CH_4 , o qual foi consumido no solo ($-1,82$ a $-0,87 \text{ kg C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Entre os ciclos de cultivo, no verão-2, a maior PPA média (71,4 %) ocasionou a maior emissão acumulada de N_2O ($9,79 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$) e menor consumo de CH_4 ($-0,40 \text{ C-CH}_4 \text{ ha}^{-1}$). O contrário foi verificado no inverno-2, com menores PPA média (57,3 %) e emissão acumulada de N_2O ($0,64 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$) e maior consumo de CH_4 ($-0,90 \text{ C-CH}_4 \text{ ha}^{-1}$). A oscilação da PPA entre os ciclos de cultivo foi devido a sazonalidade da precipitação pluviométrica. Como conclusão, os sistemas lavoura pecuária floresta, pecuária floresta, lavoura pecuária são capazes de mitigar as emissões de N_2O em relação a pecuária, apesar de terem emissões semelhantes a lavoura. A elevada PPA do solo favorece a desnitrificação na pecuária propiciando maior emissão de N_2O . A sazonalidade da precipitação pluviométrica entre os ciclos de cultivo é determinante na magnitude das emissões de CH_4 e principalmente N_2O .

Palavras-chave: Gases de Efeito Estufa. Integração Lavoura-pecuária. Porosidade preenchida por água. Precipitação pluviométrica.

3.2 ABSTRACT

Integrated crop-livestock systems are adopted in Brazil as an alternative to sustainable intensification of production. The aims of this work were to evaluate the ability of integrated systems to mitigate emissions of nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4) from the soil, in relation to crop and livestock systems; as well as to evaluate the influence of seasonality on the emissions, for two years. The study was realized in the experimental area of Nucleus of Technological Innovation in Agriculture at the experimental farm Canguiri in Pinhais - PR. The treatments evaluated were cropland (maize and black oats), livestock (pastures of guinea grass and black oats), integrated crop-livestock (rotation with one year cropland and three years pastures), integrated livestock-forest (pastures of guinea grass and black oats between eucalyptus trees rows) and integrated crop-livestock-forest (rotation with one year cropland and three years pastures between eucalyptus trees rows). The experiment had a complete randomized block design with three replicates. The two-years evaluation period was divided into four seasons, summer-1, winter-1, summer-2 and winter-2. Air samples were collected by closed static chamber method, with use of three and four chambers by plot. The concentration of N_2O and CH_4 was carried out via gas chromatography at Embrapa Florestas. In each air collection, the parameters of soil, temperature, water-filled pore space (WFPS), and nitrate and ammonium concentration were also analyzed. Determinations of density (at the end of each season), total porosity, macro and microporosity of the soil were also performed at the end of winter-2. Data were submitted to analysis of variance (F test $p < 0.05$) and mean test (Tukey's test $p < 0.05$). Livestock had the highest cumulative emission of N_2O ($11.75 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) and the highest weighted average WFPS (70.4 %). The elevated weighted average WFPS could have occurred due to the densification of the soil superficial layer, through the tendency of reductions in total porosity and macroporosity, by animal trampling. The soil use systems did not affect the cumulative emission of CH_4 , which was consumed in the soil (-1.82 to $-0.87 \text{ kg CH}_4\text{-C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$). Among seasons, the highest WFPS (71.4 %) in summer-2 caused the highest cumulative emission of N_2O ($9.79 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$), the lowest CH_4 consumption ($-0.40 \text{ kg CH}_4\text{-C ha}^{-1}$). The contrary was verified in winter-2, with the lowest WFPS (57.3 %) and cumulative emission of N_2O ($0.64 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$) and the highest CH_4 consumption ($-0.90 \text{ kg CH}_4\text{-C ha}^{-1}$). The oscillation of WFPS between seasons was due to the rainfall seasonality. As a conclusion, integrated crop-livestock-forest, integrated livestock-forest, integrated crop-livestock systems are able to mitigate N_2O and CH_4 emissions in relation to livestock, although they had similar emissions to cropland. The high WFPS of the soil in livestock favors denitrification providing greater N_2O emission in this system. The seasonality of the rainfall between the crop cycles is determinant in the magnitude of emissions of CH_4 and mainly N_2O .

Keywords: Greenhouse gases. Integrated crop-livestock. Water-filled pore space. Rainfall.

3.3 INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, muito provavelmente por atividade antrópica (IPCC, 2014), tem provocado mudanças climáticas globais e se tornou um dos principais desafios atuais da humanidade. O Brasil atingiu emissões de 1,3 Gt CO₂eq, em 2010 (MCTI, 2016), figurando entre os principais países emissores de GEE. Considerando os principais gases, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), o setor agropecuário representa 35 % das emissões nacionais (MCTI, 2016). Entre as emissões totais do Brasil, 74 % do CH₄ e 84 % do N₂O são provenientes da agropecuária (MCTI, 2016). Neste cenário, há uma crescente busca por estratégias visando à mitigação das emissões de GEE, entre elas, os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA).

Os SIPA são adotados no Brasil como alternativa para aliar a intensificação e a sustentabilidade da produção (FAO, 2010; CARVALHO et al., 2014a). São conceituados como sistemas planejados que envolvem a exploração animal e agrícola, em rotação ou em sucessão, visando atingir o sinergismo e as propriedades emergentes do sistema como um resultado das interações solo-planta-animal-atmosfera (BALBINO et al., 2011; MORAES et al., 2014). Seguindo esse conceito e de acordo com a diversidade de biomas do Brasil, há uma variedade de arranjos, espaciais e temporais, com combinações de espécies, animais e vegetais, capazes de integrar os SIPA (FAO, 2010; BALBINO et al., 2011).

No solo, esses sistemas são capazes de melhorar propriedades físicas, químicas e biológicas, sendo estes benefícios mediados pelo manejo do sistema (CARVALHO et al., 2010). Neste sentido, os SIPA podem elevar o estoque de carbono (C) (BOENI et al., 2014; GAZOLLA et al., 2015) e tornar o solo um reservatório de C atmosférico (SILVA et al., 2014), promovendo melhorias na agregação, com agregados maiores e mais estáveis (SALTON et al., 2014), sob condições de pastejo moderado. Além disso, o elevado aporte de C ao solo promove incremento na biomassa microbiana (SOUZA et al., 2010; SILVA et al., 2015) e aumenta a ciclagem de nutrientes (CARVALHO et al., 2010; ASSMANN et al., 2017).

O potencial dos SIPA em mitigar as emissões de N₂O e CH₄, a partir do solo, está em foco na pesquisa científica atual, no entanto diferentes resultados têm sido relatados. O sistema de integração lavoura pecuária apresentou emissões

acumuladas de N_2O ($1,65 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) similares a lavoura no estudo de Pergher (2014), mas a inclusão do componente arbóreo na integração foi capaz de promover uma redução mais expressiva na emissão de N_2O ($0,57 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) através da redução da porosidade preenchida por água do solo. Carvalho et al. (2017), na região Centro-Oeste, também verificaram o efeito das árvores no seu estudo, no qual a integração lavoura pecuária floresta emitiu $2,05 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ e a integração lavoura pecuária $2,84 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$. Contrário a isso, Piva et al. (2014), relataram maior emissão de N_2O em sistema de integração lavoura pecuária ($4,26 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em comparação com sistema de lavoura ($1,26 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), possivelmente devido ao adensamento da camada superficial do solo pelo pisoteio animal.

Quanto ao CH_4 , solos agrícolas atuam predominantemente como dreno atmosférico (BAYER et al., 2013), devido as condições de aerobiose do solo favoráveis a sua oxidação (DEL GROSSO et al., 2000). Carvalho et al. (2014b) em sistema de lavoura pecuária obtiveram emissão acumulada de $-0,77 \text{ kg C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e Pergher (2014) em sistema lavoura pecuária floresta $-1,7 \text{ kg C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Os processos biológicos de produção de N_2O no solo, principalmente desnitrificação e desnitrificação por nitrificantes (ZHU-BARKER; STEENWERTH, 2018; WRAGE-MÖNNIG et al., 2018), bem como a oxidação de CH_4 (DEL GROSSO et al., 2000), estão relacionados com as condições do solo, aeração (ZHU et al., 2013), umidade (BATEMAN; BAGGS, 2005) e concentração de C e nitrogênio (N) (BOUWMAN et al., 2002; CASTALDELLI et al., 2019), as quais sofrem influencia direta do manejo dos sistemas agropecuários.

Devido a importância da difusão dos SIPA como sistemas de intensificação sustentável no Brasil e as diferentes respostas encontradas pelas pesquisas recentes, há a necessidade de expansão de dados referentes a emissão de GEE em sistemas integrados. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade de sistemas integrados de produção agropecuária em mitigar emissões de óxido nitroso e metano, a partir do solo, em relação a sistemas de lavoura e pecuária. E, também, avaliar a influência da sazonalidade, considerando precipitação pluviométrica e ciclos de cultivo, na emissão de óxido nitroso e metano, a partir do solo, em dois anos agrícolas.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Descrição da área experimental

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental Canguiri da Universidade Federal do Paraná, no município de Pinhais – PR (25°23'30"S, 49°07'30"W, 935 m de altitude), localizada na área de proteção ambiental do Iraí. O clima da região é subtropical úmido mesotérmico (Cfb, Köppen) (ALVARES et al., 2013), com temperatura média mensal de 12.9 °C em julho e 20.6 °C em fevereiro, e com precipitação média anual de 1483 mm distribuída ao longo do ano (INMET, 2009). O solo do local é classificado como Cambissolo Háplico (SUGAMOSTO, 2002) com textura argilosa na camada de 0-0,10 m (490 g argila kg⁻¹ solo; 220 g silte kg⁻¹ solo e 290 g areia kg⁻¹ solo).

O experimento conduzido pelo Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA) teve início em 2013 e é composto de sete sistemas de uso do solo, isolados ou em integração, com rotação em modelo trienal. Anteriormente, a área do experimento era destinada ao cultivo de milho em sistema de preparo convencional do solo no verão e mantida em pousio no inverno (TABELA 2). No primeiro ano, o solo foi corrigido com lodo de esgoto (N VIRO®), recebeu adubação com P₂O₅ (100 kg ha⁻¹) e o cultivo de aveia preta para cobertura.

Para este estudo, foram selecionados cinco tratamentos, dispostos em delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições e parcelas com dimensões entre 0,2 ha (tratamento sem pastejo) e 1,0 ha (tratamentos com pastejo). Os tratamentos com os cultivos utilizados são descritos abaixo:

(i) Lavoura anual (Lav), com sucessão de cultivo de milho (*Zea mays* L.) no verão e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) para cobertura do solo no inverno.

(ii) Pecuária (Pec), com sucessão de pastagem perene de capim áries (*Megathyrsus maximus* Jacq. cv. Áries) no verão e pastagem de aveia preta no inverno.

(iii) Integração lavoura pecuária (LP), com rotação trienal com um ano de cultivo de milho no verão e aveia preta para cobertura do solo no inverno (lavoura) e três anos de pastagem de capim áries no verão e pastagem de aveia preta no inverno (pecuária).

(iv) Integração pecuária floresta (PF), com sucessão de pastagem de capim áries no verão e aveia preta no inverno, entre as linhas de eucalipto (*Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage).

(v) Integração lavoura pecuária floresta (LPF), com rotação trienal com um ano de cultivo de milho no verão e aveia preta para cobertura do solo no inverno (lavoura) e três anos de pastagem de capim áries no verão e pastagem de aveia preta no inverno (pecuária), entre as linhas de eucalipto.

A aveia preta, quando utilizada como cobertura do solo, foi rolada com rolo faca ao final do ciclo para a semeadura do milho na sequência.

O pastejo animal foi realizado pelo método contínuo com lotação variável, com ajustes de lotação semanais e altura média do pasto de 24 cm para aveia preta e 20 cm para o capim áries, mas dentro dos princípios do manejo rotatínuo. Os animais utilizados foram das raças Angus, ingressando na área desmamados com aproximadamente 180 kg. Os ciclos de pastejo iniciaram entre junho e agosto, após o estabelecimento da pastagem de aveia preta e terminaram entre abril e maio com a roçada do capim áries.

Para o PF e o LPF, o eucalipto foi implantado em 2013 em linhas simples e em curvas de nível, com espaçamento de 14 m entre linhas e 2 m entre árvores, com densidade inicial de 357 árvores ha⁻¹. No inverno de 2017, realizou-se o desbaste das árvores, alterando o espaçamento para 14 m entre linhas e 4 m entre árvores.

O período de avaliação, de setembro de 2016 a setembro de 2018, foi dividido em ciclos de cultivos, com base nas datas da semeadura das culturas da Lav sendo eles, verão-1, inverno-1, verão-2 e inverno-2. A sequência de cultivos e as principais práticas de manejo de cada tratamento, nos dois anos do estudo, estão apresentadas na Figura 1.

TABELA 2 – HISTÓRICO DE CULTIVOS DA ÁREA EXPERIMENTAL NO PERÍODO DE 2011 A 2018, NO INVERNO E VERÃO, PARA OS TRATAMENTOS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).

Ano	Estação	Lav	Pec	LP	PF	LPF
2011	Inverno				pousio	
	Verão				preparo convencional do solo/milho	
2012	Inverno	aveia preta	aveia preta	aveia preta	aveia preta	aveia preta
	Verão	áries ¹	áries ¹	áries ¹	áries ¹	áries ¹
2013	Inverno	aveia preta	aveia preta	aveia preta	eucalipto ² /aveia	eucalipto ² /aveia
	Verão	milho/girassol	áries	áries	eucalipto/áries	eucalipto/áries
2014	Inverno	aveia preta	aveia preta	aveia preta	eucalipto/aveia	eucalipto/aveia
	Verão	milho/girassol	áries	áries	eucalipto/áries	eucalipto/áries
2015	Inverno	aveia preta	aveia preta	aveia preta	eucalipto/aveia	eucalipto/aveia
	Verão	milho	áries-pastejo ³	áries-pastejo ³	eucalipto/áries-pastejo ³	eucalipto/áries-pastejo ³
2016	Inverno	aveia preta	aveia-pastejo	aveia preta	eucalipto/aveia-pastejo	eucalipto/aveia
	Verão	milho	áries-pastejo	milho	eucalipto/áries-pastejo	eucalipto/milho
2017	Inverno	aveia preta	aveia-pastejo	aveia-pastejo	eucalipto/aveia-pastejo	eucalipto/aveia-pastejo
	Verão	milho	áries-pastejo	áries-pastejo	eucalipto/áries-pastejo	eucalipto/áries-pastejo
2018	Inverno	aveia preta	aveia-pastejo	aveia-pastejo	eucalipto/aveia-pastejo	eucalipto/aveia-pastejo

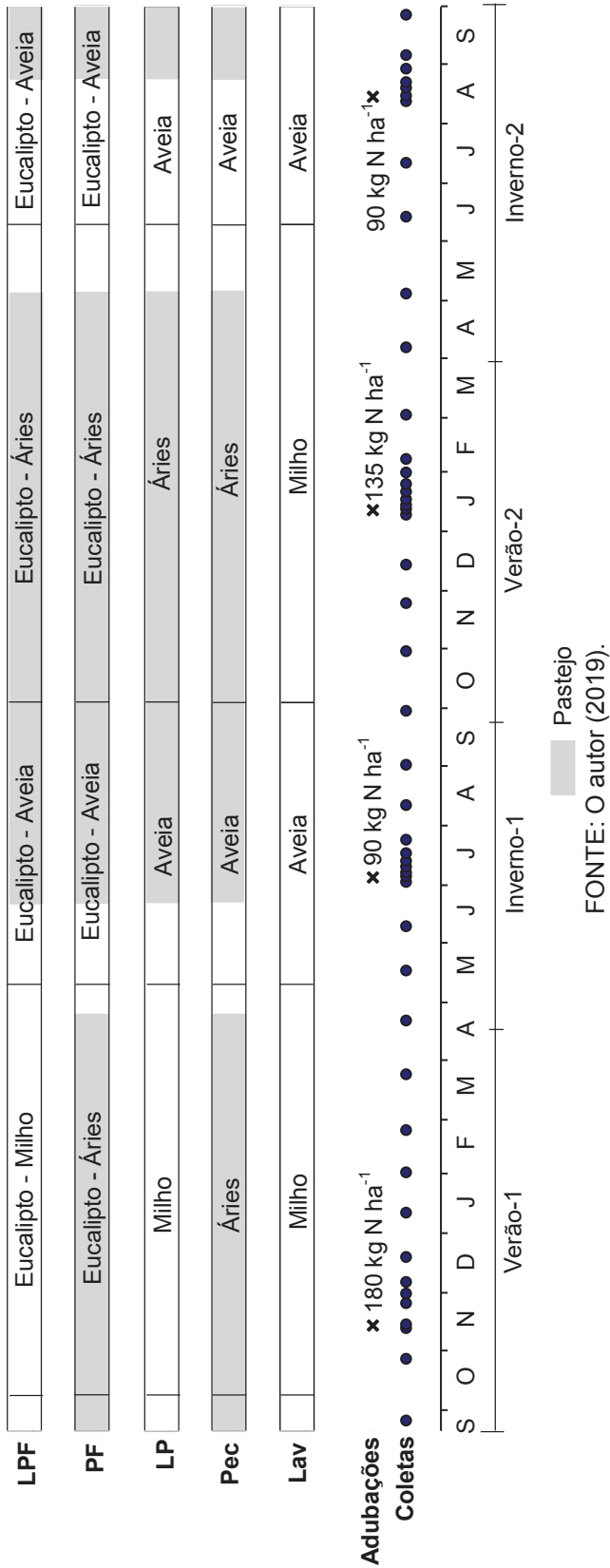
FONTE: O autor (2019).

¹Implantação do capim áries em sistema de plantio direto com densidade de 9 kg ha⁻¹.

²Implantação do eucalipto em linhas simples, com espaçamento de 14 m entre linhas e 2 m entre árvores.

³Início do pastejo animal no experimento.

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS CULTIVOS, PASTEJOS, ADUBAÇÕES E SESSÕES DE COLETA DE AR, DE SETEMBRO DE 2016 A SETEMBRO DE 2018, NOS TRATAMENTOS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).



3.4.2 Determinação das emissões de N_2O e CH_4 a partir do solo

Os fluxos de N_2O e CH_4 do solo foram avaliados durante dois anos, entre 26 de setembro de 2016, logo antes da semeadura do milho e 27 de setembro de 2018, ao final da cultura de aveia preta, totalizando 47 sessões de amostragens, com intervalos de 1 a 30 dias, sendo os intervalos menores logo após a aplicação de nitrogênio (FIGURA 1).

As amostras de ar foram coletadas pelo método de câmara estática fechada (MOSIER, 1989; PARKIN et al., 2003), com câmaras de PVC de 35 cm de altura e 32 cm de diâmetro, que eram acopladas à bases metálicas circulares também com 32 cm de diâmetro, as quais foram previamente fixadas a 5 cm no solo. As câmaras eram revestidas com manta térmica e equipadas com termômetro digital, ventilador de 12 V para homogeneização do ar e com uma cinta de borracha para vedação com a base metálica.

Em cada parcela foram colocadas três bases metálicas, entretanto nas parcelas com componente arbóreo foram colocadas quatro bases, duas na linha e duas na entrelinha de árvores. Cada base metálica foi posicionada no centro de uma miniparcela de 1,5 x 1,5 m (2,25 m²), e estas eram removidas antes das operações de semeadura e colheita, e logo após recolocadas. Durante a aplicação de fertilizante na parcela, as miniparcelas foram cobertas com lonas plásticas.

As sessões de coletas de ar, iniciadas às 9 h, foram realizadas em quatro tomadas de tempos 0, 15, 30 e 45 minutos após o acoplamento da câmara na base metálica. Em cada tempo, coletou-se uma amostra de ar com seringas de polipropileno de 20 mL encaixadas em válvulas fixas na parte superior das câmaras. O conteúdo de cada seringa foi transferido para frasco de vidro de 12 mL (Exetainers) previamente evacuado, onde ficou armazenado até a análise. A determinação da concentração dos gases foi realizada via cromatografia gasosa pelo equipamento GC - Trace 1310 (Embrapa Florestas) equipado com detector de captura de elétrons e detector de ionização de chama, para as avaliações de N_2O e CH_4 , respectivamente.

Os fluxos de N_2O e CH_4 foram calculados a partir do coeficiente angular da reta do modelo linear ajustado, que representa o incremento da concentração do gás contido na câmara no tempo de avaliação de 45 min. A concentração do gás contido na câmara foi calculada pela equação do gás ideal, a partir da temperatura e

pressão do ar (assumida como 1 atm), o volume da câmara e a constante universal do gás ideal.

A emissão acumulada de N_2O e CH_4 foi calculada através da integração dos fluxos diários ao longo do período de avaliação (área abaixo da curva). O fator de emissão de N_2O foi calculado pela relação entre a emissão acumulada de N_2O , descontada a emissão acumulada de N_2O basal do solo, pela dose de nitrogênio adicionado via adubação. A emissão basal foi estimada através da média dos quatro menores fluxos do período avaliado.

3.4.2.1 Adubações nitrogenadas

As adubações nitrogenadas nas bases e nas miniparcelas foram realizadas nos dias 14 de novembro de 2016, verão-1, (180 kg N ha^{-1}), 05 de julho de 2017, inverno-1 (90 kg N ha^{-1}), 12 de janeiro de 2018, verão-2, (135 kg N ha^{-1}) e 15 de agosto de 2018, inverno-2, (90 kg N ha^{-1}). A adubação realizada com ureia foi feita manualmente a lanço e em cobertura, em todos os tratamentos. A quantidade de ureia aplicada seguiu as doses determinadas pela coordenação do NITA para os sistemas de uso em cada ciclo de cultivo.

3.4.3 Parâmetros de solo e meteorológicos

Em cada sessão de avaliação de gases, outros parâmetros de solo da camada 0-5 cm também foram determinados em cada miniparcela. Uma amostra composta de solo, duas subamostras homogeneizadas, foi coletada com trado calador para algumas dessas determinações.

A temperatura do solo foi medida com termômetro digital. As concentrações de NH_4^+ e NO_3^- foram determinadas através de extração com 5 g de solo úmido e solução de KCl 1 M, agitação por 30 min, centrifugação por 15 min e posterior filtragem do sobrenadante. A análise do extrato foi realizada por espectrofotometria em sistema de análise por injeção em fluxo na Embrapa Florestas (HAMBRIDGE, 2007a; 2007b). A umidade gravimétrica foi obtida através da secagem de amostra de solo em estufa com circulação forçada de ar a 105°C por 48 h. A porosidade preenchida por água (PPA) foi calculada através da densidade e da umidade do solo, além da densidade de partículas. A densidade de partículas foi determinada

segundo metodologia de Teixeira et al. (2017). A densidade do solo foi obtida em cada ciclo de cultivo antes do final do ciclo da cultura, através da coleta de solo com anéis volumétricos (3,5 cm de altura e 4,7 cm de diâmetro) na camada de 0-0,05 m (BLAKE; HARTGE, 1986).

Para determinação de um valor médio dos parâmetros temperatura do solo, PPA e concentração de NH_4^+ e NO_3^- , foram calculadas médias ponderadas através da relação entre a integral do valor do parâmetro ao longo do período avaliado e o número de dias do período.

Os atributos de porosidade do solo foram determinados ao final do inverno-2, através da coleta de solo com anéis volumétricos na camada de 0-5 cm. As amostras foram saturadas por capilaridade, submetidas à tensão de 0,60 m de coluna d'água (-6 KPa) até equilíbrio, e secas a 105 °C para determinação da microporosidade. A porosidade total foi obtida pela relação entre a diferença da massa de solo saturado e massa de solo seco (105 °C) pelo volume do solo. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade do solo (TEIXEIRA et al., 2017).

Informações de precipitação pluviométrica diária e temperatura média diária do ar foram disponibilizadas pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR da estação meteorológica mais próxima ao experimento (Pinhais – PR).

3.4.4 Análise estatística

Os dados de fluxo de emissão de N_2O e CH_4 de cada evento de coleta foram submetidos à análise da variância (teste F $p < 0,05$) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$ ou $p < 0,10$). Para os dados de emissão acumulada, PPA média, temperatura do solo média, concentração de NO_3^- e NH_4^+ média e densidade do solo considerou-se um esquema fatorial, com os ciclos de cultivo e os sistemas de uso como fatores (4x5). Os dados foram submetidos a análise de variância (teste F $p < 0,05$) e comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$ ou $p < 0,10$). Os dados foram analisados através do programa estatístico Sisvar versão 5.6 (FERREIRA, 2014), e as análises de correlação de Pearson ($p < 0,05$) com o programa Sigmaplot 10.

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Emissão de N₂O

Os fluxos de N₂O foram basais durante a maior parte do período, com picos de emissão após as adubações nitrogenadas (GRÁFICO 2A). O maior pico de emissão, registrado no verão-2, teve duração de 19 dias, atingindo valores de 2341,4 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, no sexto dia após a adubação. Enquanto que, o menor pico de emissão, no inverno-2, atingiu 200,7 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, oito dias após a adubação. Considerando a emissão em cada ciclo de cultivo, no verão-2 houve a maior emissão acumulada (9,79 kg N-N₂O ha⁻¹) e no inverno-2 houve a menor emissão, com 0,64 kg N-N₂O ha⁻¹ (TABELA 3). As emissões no inverno-1 e no verão-1 foram similares, 3,27 kg N-N₂O ha⁻¹ e 3,26 kg N-N₂O ha⁻¹, respectivamente.

Em alguns eventos de coleta, a Pec apresentou maior fluxo (GRÁFICO 2A), resultando em maior emissão acumulada de N₂O (11,75 kg N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹) diferindo dos demais sistemas (TABELA 3). Os SIPA, LP, PF e LPF tiveram emissões de 8,11, 7,00, e 8,52 kg N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹ respectivamente, enquanto que a Lav apresentou emissão de 7,01 kg N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹.

3.5.2 Emissão de CH₄

Os fluxos de CH₄ foram predominantemente negativos, mas em algumas ocasiões positivos, oscilando entre -62,2 e 47,5 $\mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (GRÁFICO 2B), o que resultou em emissões acumuladas negativas (consumo de CH₄) nos ciclos de cultivo. Com isso, o verão-2 teve o menor consumo (-0,40 kg C-CH₄ ha⁻¹), similar ao inverno-1 (-0,45 kg C-CH₄ ha⁻¹), enquanto que o maior consumo foi encontrado no inverno-2 (-0,90 kg C-CH₄ ha⁻¹), no qual em todos os eventos de coleta houve influxo de CH₄ (TABELA 3). Quanto aos sistemas de uso do solo, não houve diferença na emissão acumulada, com valores entre -1,82 kg C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹ para a Lav e -0,87 kg C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹ para a PF (TABELA 3).

TABELA 3 – EMISSÕES ACUMULADAS DE N₂O E CH₄ E FATOR DE EMISSÃO DE N₂O PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).

	Lav	Pec	LP	PF	LPF	
Emissão acumulada N₂O (kg N-N₂O ha⁻¹)						
						Média
Verão-1	2,84 Bb	5,37 Ba	2,06 BCb	3,47 Bab	2,56 BCb	3,26 B
Inverno-1	3,17 Ba	4,63 Ba	2,92 Ba	2,52 BCa	3,11 Ba	3,27 B
Verão-2	7,07 Ab	12,84 Aa	10,72 Aa	7,44 Ab	10,87 Aa	9,79 A
Inverno-2	0,95 Ba	0,66 Ca	0,51 Ca	0,58 Ca	0,50 Ca	0,64 C
Média anual	7,01 b	11,75 a	8,11 b	7,00 b	8,52 b	
Emissão acumulada CH₄ (kg C-CH₄ ha⁻¹)						
						Média
Verão-1	-0,74 Aa	-0,37 Aa	-0,55 Aa	-0,74 Ba	-0,87 Aa	-0,66 AB
Inverno-1	-0,48 Aa	-0,31 Aa	-0,53 Aa	-0,26 ABa	-0,68 Aa	-0,45 A
Verão-2	-1,14 Ab	-0,40 Aab	-0,50 Aab	0,30 Aa	-0,27 Aab	-0,40 A
Inverno-2	-1,27 Aa	-0,94 Aa	-0,86 Aa	-1,05 Ba	-0,37 Aa	-0,90 B
Média anual	-1,82 ns	-1,01	-1,22	-0,87	-1,09	
Fator de emissão de N₂O (%)						
						Média
Verão-1	0,76 Ba	1,26 Ba	1,04 BCa	0,80 BCa	0,89 Ca	0,95 C
Inverno-1	2,80 Aab	4,22 Aa	2,54 Bab	2,25 ABb	2,70 Bab	2,90 B
Verão-2	3,28 Ab	5,96 Aa	4,96 Aab	3,43 Ab	5,48 Aa	4,62 A
Inverno-2	0,65 Ba	0,40 Ba	0,19 Ca	0,22 Ca	0,19 Ca	0,33 C
Média	1,87 b	2,96 a	2,18 ab	1,67 b	2,31 ab	

FONTE: O autor (2019).

Médias seguidas por letras maiúsculas comparam ciclos de cultivo em cada sistema de uso do solo (coluna). Médias seguidas por letras minúsculas comparam sistemas de uso do solo em cada ciclo de cultivo (linha) pelo teste de Tukey (p<0,05).

ns: não significativo.

3.5.3 Fator de emissão de N₂O

Entre os ciclos de cultivo, o verão-2 obteve o maior fator de emissão, com 4,62 %, e o verão-1 e inverno-2 os menores, com 0,95 e 0,33 %, respectivamente. O sistema integrado PF apresentou o menor fator de emissão médio, 1,67 %, similar a Lav com 1,87 % (TABELA 3). O maior fator de emissão de N₂O ocorreu na Pec (2,96 %), enquanto que a LP e a LPF não diferiram dos demais.

3.5.4 Parâmetros de solo e meteorológicos

3.5.4.1 Porosidade preenchida por água

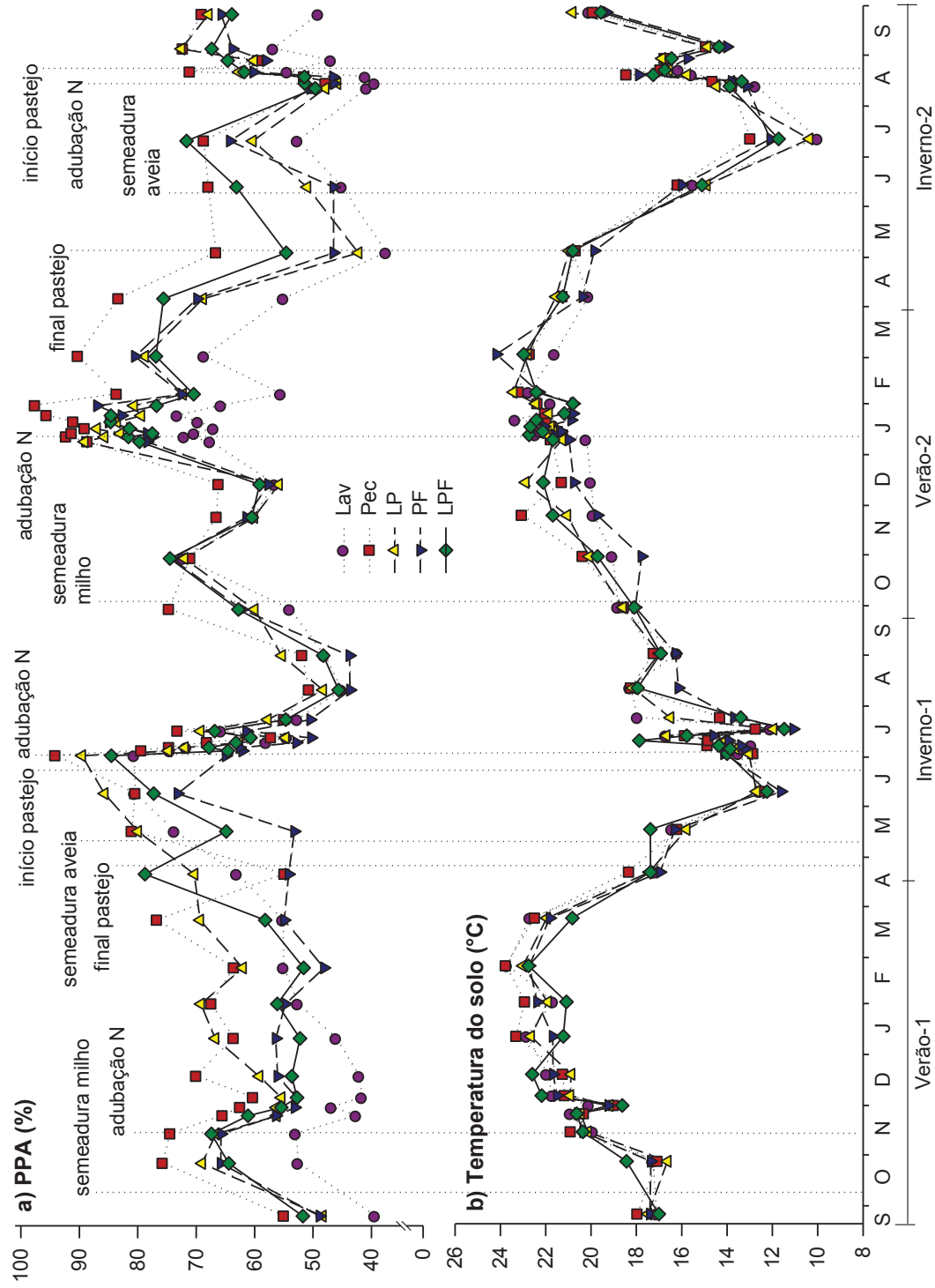
A PPA do solo oscilou entre 37,6 % e 97,7 % com base nos eventos de precipitação pluviométrica (GRÁFICO 3A). Quanto aos ciclos de cultivo, a maior PPA do solo média foi registrada no verão-2 (71,4 %), as menores foram encontradas nos verão-1 e inverno-2, com 59,1 e 57,3 %, respectivamente e o inverno-1 apresentou PPA média intermediária (63,6 %).

Ao longo do período avaliado, foi observado que a Pec apresentou as maiores e a Lav apresentou as menores PPA do solo, o que refletiu na PPA média. Os solos dos SIPA apresentaram porcentagens de PPA média intermediárias, 64,7, 63,9 e 59,3 %, para LP, LPF e PF, respectivamente (TABELA 4). Enquanto que, o solo da Pec apresentou a maior PPA média (70,4 %) e o solo da Lav a menor (55,7 %).

3.5.4.2 Temperatura do solo

A temperatura do solo seguiu as oscilações temporais das estações do ano, com valores entre 10,0 °C e 24,2 °C durante os eventos de coleta (GRÁFICO 3B). No verão-2, a temperatura do solo média (21,2 °C) foi maior do que no verão-1 (20,7 °C). Entre os invernos, o inverno-2 proporcionou a maior temperatura do solo média (16,3 °C) do que o inverno-1 (15,7 °C). Entre os sistemas de uso, a maior temperatura média foi registrada no solo da Pec (18,9 °C) e a menor no solo da PF (18,1 %), e os demais sistemas de uso foram intermediários (TABELA 4).

GRÁFICO 3 – POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA (A) E TEMPERATURA DO SOLO (B) DE SETEMBRO DE 2016 A SETEMBRO DE 2018 PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4 – POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA DO SOLO MÉDIA E TEMPERATURA DO SOLO MÉDIA PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).

	Lav	Pec	LP	PF	LPF	
PPA do solo média (%)						
						Média
Verão-1	50,4 Bd	67,3 Ba	64,0 Bab	55,8 Bcd	58,2 Bbc	59,1 C
Inverno-1	62,7 Aa	68,1 Ba	68,3 ABa	55,5 Bb	63,5 Ba	63,6 B
Verão-2	63,3 Ac	79,6 Aa	71,1 Ab	71,5 Ab	71,4 Ab	71,4 A
Inverno-2	46,7 Bc	66,8 Ba	55,4 Cb	55,3 Bb	62,5 Ba	57,3 C
Média	55,7 d	70,4 a	64,7 b	59,5 c	63,9 b	
Temperatura do solo média (°C)						
						Média
Verão-1	21,0 Aa	21,1 Aa	20,5 Ba	20,5 Aa	20,4 Ba	20,7 B
Inverno-1	15,9 Ba	15,9 Cab	15,8 Cab	15,1 Cb	15,8 Cab	15,7 D
Verão-2	20,5 Ac	21,6 Aa	21,6 Aa	20,6 Abc	21,4 Aab	21,2 A
Inverno-2	15,9 Bb	16,9 Ba	16,3 Cab	16,2 Bab	16,3 Cab	16,3 C
Média	18,3 bc	18,9 a	18,6 ab	18,1 c	18,5 abc	

FONTE: O autor (2019).

Médias seguidas por letras maiúsculas comparam ciclos de cultivo em cada sistema de uso do solo (coluna). Médias seguidas por letras minúsculas comparam sistemas de uso do solo em cada ciclo de cultivo (linha) pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.5.4.3 Atributos físicos do solo

As densidades do solo foram crescentes ao longo dos ciclos de cultivo, com a maior densidade para o inverno-2 ($1,18 \text{ g cm}^{-3}$), seguido pelo verão-2 ($1,17 \text{ g cm}^{-3}$) e pelo inverno-1 ($1,11 \text{ g cm}^{-3}$) e a menor densidade do solo ocorreu no verão-1, $1,02 \text{ g cm}^{-3}$ (TABELA 5).

Entre os sistemas de uso, as densidades do solo médias para os SIPA foram similares, com valores de $1,19$, $1,15$ e $1,11 \text{ g cm}^{-3}$, para LPF, PF e LP, respectivamente não diferindo do solo sob Pec ($1,18 \text{ g cm}^{-3}$). E, a menor densidade média do solo foi encontrada para a Lav, com $0,97 \text{ g cm}^{-3}$.

Para a porosidade total do solo, os SIPA, PF e LPF, apresentaram valores intermediários, não diferindo da LP ($0,61 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e da Pec ($0,56 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (TABELA 5). No solo sob Lav foi encontrado o maior volume total de poros ($0,67 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Quanto a macroporosidade, a LP e a LPF apresentaram valores intermediários, não diferindo dos menores volumes de macroporos do solo sob PF e Pec, com $0,12$ e $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente, e da Lav com a maior

macroporosidade do solo ($0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). A microporosidade do solo foi semelhante para todos os sistemas de uso.

TABELA 5 - ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).

	Lav		Pec		LP		PF		LPF			
Densidade (g cm ⁻³)											Média	
Verão-1	0,86	Bb	1,11	Aa	1,01	Bab	1,02	Bab	1,08	Ba	1,02	C
Inverno-1	1,03	Aa	1,13	Aa	1,08	ABa	1,13	ABa	1,17	ABa	1,11	B
Verão-2	0,96	ABb	1,25	Aa	1,19	Aa	1,21	Aa	1,25	Aa	1,17	AB
Inverno-2	1,02	Ab	1,24	Aa	1,16	ABab	1,23	Aa	1,25	Aa	1,18	A
Média	0,97	b	1,18	a	1,11	a	1,15	a	1,19	a		
Porosidade Total (cm ³ cm ⁻³)												
	0,67	a	0,56	c	0,61	b	0,57	bc	0,57	bc		
Macroporosidade (cm ³ cm ⁻³)												
	0,22	a	0,10	b	0,13	ab	0,12	b	0,13	ab		
Microporosidade (cm ³ cm ⁻³)												
	0,45	ns	0,46		0,48		0,45		0,44			

FONTE: O autor (2019).

Médias seguidas por letras maiúsculas comparam ciclos de cultivo em cada sistema de uso do solo (coluna). Médias seguidas por letras minúsculas comparam sistemas de uso do solo em cada ciclo de cultivo (linha) pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

ns: não significativo.

3.5.4.4 Concentração de NH_4^+ e NO_3^-

As concentrações de NH_4^+ e NO_3^- no solo apresentaram picos após as adubações nitrogenadas ao longo do período (GRÁFICO 4). A amplitude da concentração de NH_4^+ oscilou entre 2,51 e 423,61 $\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$, e a da concentração de NO_3^- entre 4,52 e 174,94 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$. Entre os ciclos de cultivo, para o NH_4^+ , o inverno-2 apresentou a maior concentração (43,06 $\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$), diferindo do verão-1 e inverno-1 com valores intermediários, e do verão-2 com a menor concentração média (20,53 $\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$) (TABELA 6). Para o NO_3^- , o verão-2 apresentou a menor concentração média (21,72 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$), diferindo dos demais ciclos. Os sistemas de uso do solo não influenciaram a concentração de NH_4^+ e NO_3^- médias (TABELA 6).

TABELA 6 – CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO INORGÂNICO MÉDIA PARA OS SISTEMAS LAVOURA (LAV), PECUÁRIA (PEC), INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA (LP), INTEGRAÇÃO PECUÁRIA FLORESTA (PF) E INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA (LPF).

	Lav		Pec		LP		PF		LPF			
Concentração de amônio média (mg N-NH ₄ ⁺ kg ⁻¹)											Média	
Verão-1	32,26	ABa	28,98	Ba	25,38	Ba	27,92	ABa	26,78	Ba	28,26	B
Inverno-1	30,18	Ba	28,49	BCa	31,76	Ba	32,68	ABa	42,90	Aa	33,20	B
Verão-2	24,47	Ba	14,05	Ca	18,51	Ba	23,45	Ba	22,20	Ba	20,53	C
Inverno-2	41,14	Aab	49,47	Aa	43,25	Aab	34,24	Ab	47,18	Aa	43,06	A
Média	32,01	ns	30,25		29,72		29,57		34,76			
Concentração de nitrato média (mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)											Média	
Verão-1	34,12	Aa	26,56	Aa	33,98	Aa	30,71	Aa	29,62	Aa	31,00	A
Inverno-1	33,48	Aa	36,43	Aa	31,58	Aa	32,85	Aa	41,92	Aa	35,25	A
Verão-2	22,23	Aa	21,54	Aa	20,83	Aa	18,01	Aa	26,00	Aa	21,72	B
Inverno-2	38,55	Aa	33,92	Aa	29,44	Aa	30,34	Aa	33,21	Aa	33,09	A
Média	32,10	ns	29,61		28,95		27,98		32,69			

FONTE: O autor (2019).

Médias seguidas por letras maiúsculas comparam ciclos de cultivo em cada sistema de uso do solo (coluna). Médias seguidas por letras minúsculas comparam sistemas de uso do solo em cada ciclo de cultivo (linha) pelo teste de Tukey (p<0,05).

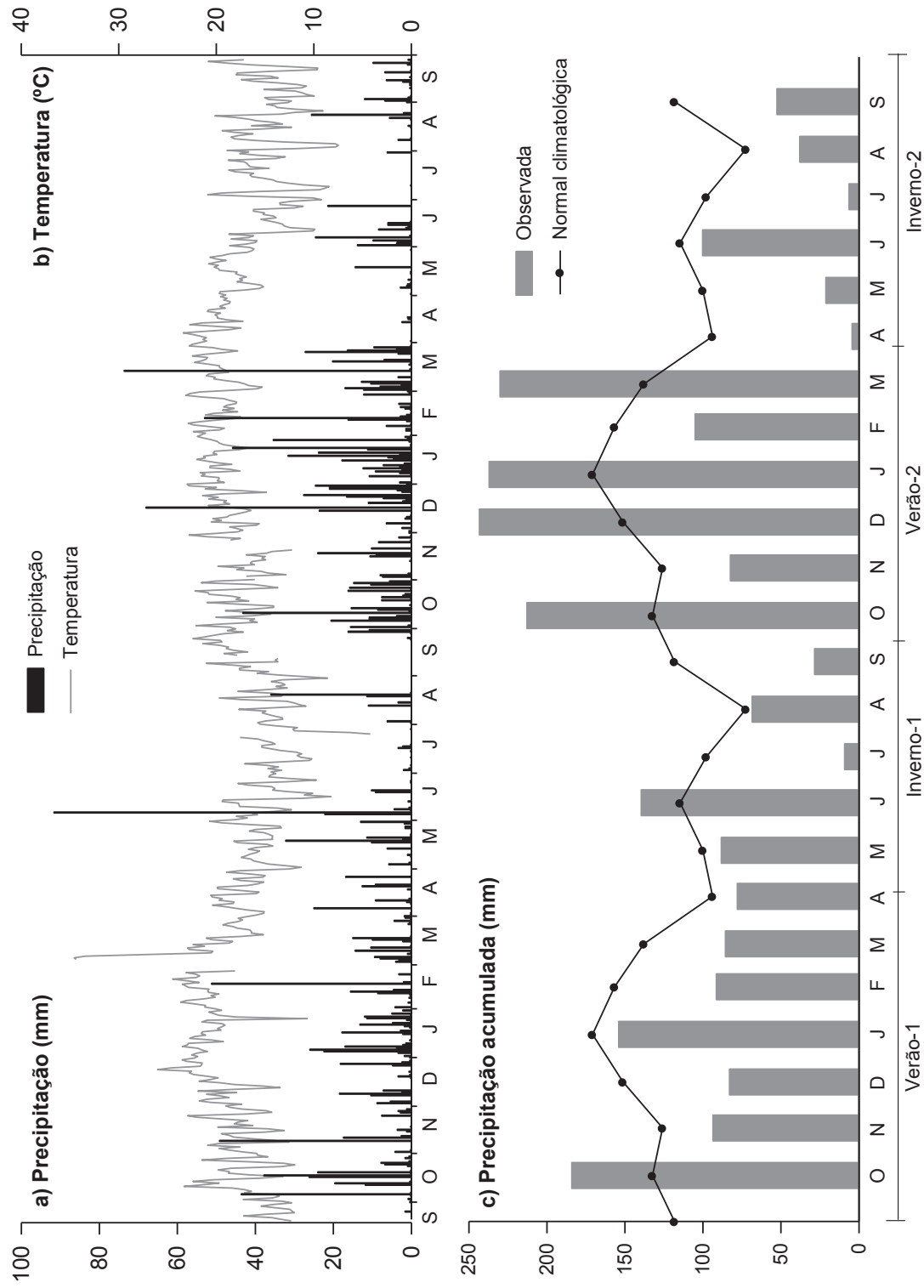
ns: não significativo.

3.5.4.5 Precipitação pluviométrica e temperatura do ar

A precipitação pluviométrica acumulada durante os dois anos avaliados foi de 2433 mm (GRÁFICO 5). Entre os ciclos de cultivo, no verão-2 houve o maior volume de precipitação, 1121 mm, seguido pelo verão-1 com 753 mm. Os meses com maior pluviosidade foram dezembro (243 mm), no verão-2, e outubro com 184 mm no verão-1. Nos invernos 1 e 2 ocorreram os menores volumes de precipitação com 340 e 219 mm, respectivamente, sendo o mês mais chuvoso junho com 140 mm no inverno-1 e 100 mm no inverno-2. Os meses com menores pluviosidades foram julho, no inverno-2, com 6 mm e abril, no verão-2, com 4 mm.

A normal climatológica de precipitação pluviométrica anual da região é de 1483 mm, com a maior pluviosidade em janeiro (172 mm) e a menor em agosto (73 mm) (INMET, 2009). A média diária das temperaturas do ar nos ciclos de cultivo foi diferente entre inverno e verão. Os invernos 1 e 2 registraram temperaturas de 15,2 e 15,4 °C, e os verões 1 e 2 temperaturas similares (19,1 e 19,2 °C).

GRÁFICO 5 - PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DIÁRIA (A) E TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DO AR (B) E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MENSAL (C) DURANTE O PERÍODO DE ESTUDO, SETEMBRO DE 2016 A SETEMBRO DE 2018.



FONTE: SIMEPAR (2018) e INMET (2009).

3.6 DISCUSSÃO

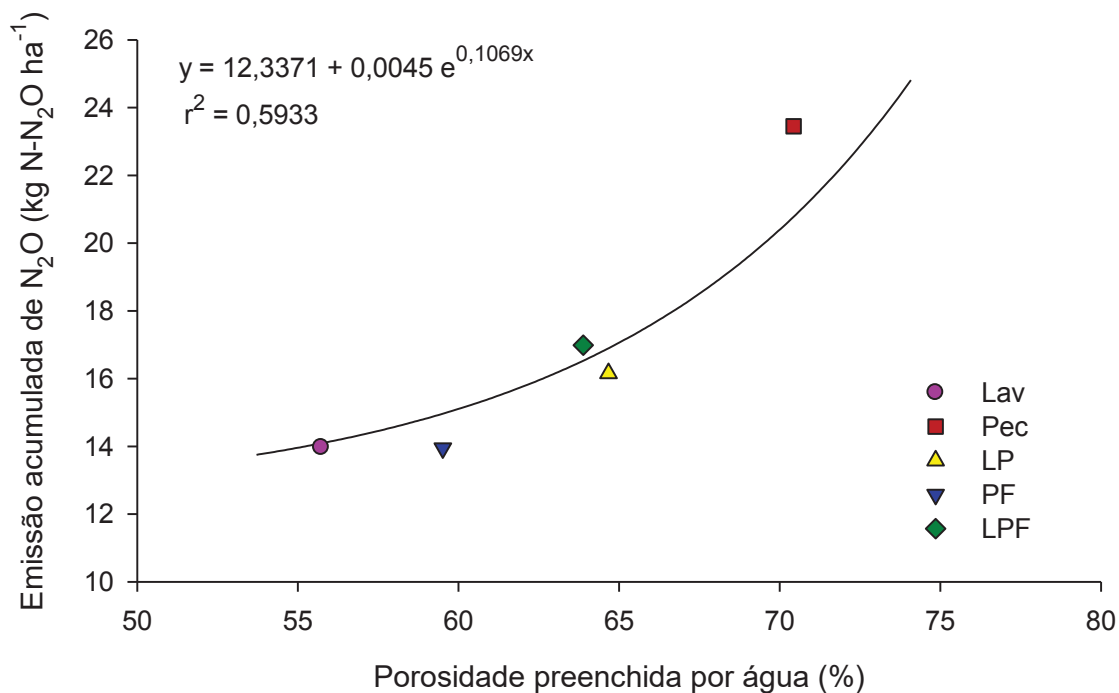
3.6.1 Sistemas integrados e as emissões de N₂O

As menores emissões acumuladas de N₂O observadas nos sistemas integrados, LP, PF e LPF em relação a Pec (TABELA 3) estão associadas as menores PPA médias destes sistemas (TABELA 4), como indica a correlação forte ($r=0,74$) entre essas variáveis (TABELA 7). A produção de N₂O ocorre principalmente por dois processos no solo, pela desnitrificação, como um subproduto da redução incompleta do NO₃⁻ a N₂ em condições anaeróbicas (ZHU-BARKER; STEENWERTH, 2018); e pela nitrificação, via desnitrificação por nitrificantes, através da oxidação da amônia a nitrito e posterior redução a N₂O, em condições aeróbicas (WRAGE-MÖNNIG et al., 2018; ZHU et al., 2013). E a PPA do solo é um dos fatores que podem delimitar a predominância dos processos de produção de N₂O.

Com PPA médias próximas a 60 %, como registrado nos SIPA (TABELA 4), o processo predominante de produção de N₂O é a desnitrificação por nitrificantes (BATEMAN; BAGGS, 2005; WELL et al., 2006) Enquanto que a desnitrificação é o processo mais eficiente em PPA média de 70 % (WELL et al., 2006; BERGSTERMANN et al., 2011), como encontrado na Pec. Em seu estudo, Bateman e Baggs (2005) relatam que a relação da PPA com a produção de N₂O, no qual 81 % do N₂O produzido em solo sob PPA de 60 % foi proveniente da desnitrificação por nitrificantes. Mas com a elevação da umidade do solo (PPA de 70 %) a desnitrificação representou 100 % da produção de N₂O.

Além disso, a magnitude da emissão é diferenciada, pois um incremento de 10 % na PPA média, entre a PF e a Pec, pode ter ocasionado uma diferença de 4,75 kg N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹ na emissão acumulada (GRÁFICO 6). Este incremento exponencial é verificado na literatura, no estudo de Bateman e Baggs, (2005), no qual a diferença de emissão entre o solo com PPA de 60 % e o de 70 % foi de seis vezes, devido a predominância de microsítios anaeróbicos. WU et al. (2017) relatou incremento de 10 vezes entre a emissão de N₂O do solo com PPA de 65 % para o solo com PPA de 80 %.

GRÁFICO 6 - REGRESSÃO ENTRE EMISSÃO DE N₂O ACUMULADA E POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA DO SOLO MÉDIA



FONTE: O autor (2019).

A diferença de emissão de N₂O entre a Pec e os SIPA possivelmente está relacionada com a presença dos animais em pastejo, os quais através do pisoteio podem ter provocado adensamento da camada superficial do solo, com diminuição da porosidade total e macroporosidade do solo e tendência de aumento da densidade (TABELA 5). Além disso, na Pec, o efeito do pisoteio animal é o mais pronunciado entre os demais sistemas, pois a maior produção de forragem, 28,2 Mg ha⁻¹ em 2016/17 e 25,9 Mg ha⁻¹ em 2017/18, permitiu maior carga animal no sistema (PORTUGAL et al., 2018). Balaine et al. (2013) observou aumento da emissão de N₂O em solo com maior densidade, resultado da compactação que aumentou a porcentagem de microporos, diminuindo a difusividade relativa do gás no solo.

O pisoteio animal, em sistemas integrados, provoca, na camada superficial do solo, aumento da resistência mecânica do solo à penetração (CONTE et al., 2011), aumento do grau de compactação (DEBIASI; FRANCHINI, 2012; CECAGNO et al., 2016), redução na infiltração de água no solo e diminuição da porosidade total do solo (BONETTI et al., 2019), mas sem alcançar níveis danosos as culturas e reduzir a qualidade física do solo (MOREIRA et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2019).

Entretanto, a inclusão do ciclo de lavoura em SIPA pode diminuir o efeito do pisoteio animal no solo (AMBUS et al., 2018), visto que a LP apresentou maior porosidade total em relação a Pec (TABELA 5). Este efeito foi relatado no estudo de Bonetti et al. (2019), no qual após o cultivo de lavoura de soja em sistema integrado houve diminuição da densidade e aumento na porosidade do solo, amenizando o efeito do pisoteio animal. Além disso, a inclusão do ciclo de lavoura pode ter ocasionado menor PPA média e menor emissão de N_2O no solo sob LP e LPF em relação a Pec. Contudo, em estudo no Cerrado brasileiro, comparando sistema de pastagem de braquiária e sistema de rotação lavoura pecuária com algodão, soja, milho + braquiária pastejada, Carvalho et al. (2014b) não encontraram diferença para emissão de N_2O entre os dois sistemas, 1,67 e 2,00 kg N- N_2O ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Os autores afirmam que isso se deve a elevada capacidade de drenagem do solo da região (Latossolo argiloso), permitindo rápida infiltração de água no solo e maior aeração.

A tendência de menor emissão de N_2O dos sistemas com componente arbóreo, PF e LPF, em relação a Pec, pode ser decorrente da menor PPA média destes sistemas, devido a redução da umidade da camada superficial. A menor umidade do solo pode estar relacionada com a menor temperatura do solo média (TABELA 4) decorrente do microclima criado pelas árvores, que reduz as oscilações térmicas e a evapotranspiração da pastagem (KARKI; GOODMAN, 2013). Contudo, a demanda hídrica do sistema é mais elevada devido ao consumo pelas árvores, diminuindo a umidade superficial do solo (EASTHAM; ROSE, 1988). Outro fator que pode ter contribuído é o fato de que a presença das linhas de árvores em sistemas integrados reduz a produção de forragem, provocando a elongação do colmo e a diminuição do perfilhamento (PONTES et al., 2018), devido ao sombreamento das plantas e consequente redução da taxa de assimilação de CO_2 (BARRO et al., 2008; KIRCHNER et al., 2010; SOARES et al., 2016; PORTUGAL et al., 2018). Com isso, há uma menor taxa de cobertura do solo nesses sistemas, deixando área de solo exposto, favorecendo a evaporação da água no solo na camada superficial e reduzindo a PPA do solo.

Em estudo no subtrópico brasileiro, Pergher (2014) encontrou emissões acumuladas similares para LPF (0,57 kg N- N_2O ha⁻¹ ano⁻¹) e LP (1,65 kg N- N_2O ha⁻¹ ano⁻¹), mas o autor indicou a tendência do solo sob LPF emitir menos N_2O devido a menor cobertura do solo e a maior demanda evapotranspirativa do sistema com

árvores, o que reduziu a PPA do solo. Enquanto que, no Cerrado brasileiro, Carvalho et al. (2017) relataram menor emissão acumulada para a integração lavoura pecuária floresta, com $2,05 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em relação a lavoura pecuária, com $2,84 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, justificada pela adição de compostos fenólicos ao solo pela liteira do eucalipto, os quais reduzem a biomassa microbiana.

As emissões semelhantes entre os sistemas integrados e a Lav podem ser devido as menores PPA e temperatura do solo médias neste sistema (TABELA 4), decorrentes da menor densidade média e maior porosidade total do solo (TABELA 5). O efeito da Lav na densidade e na porosidade do solo, diferente dos demais sistemas, possivelmente é proveniente do elevado aporte de biomassa ao solo neste experimento, chegando a adições de 9 Mg ha^{-1} nos anos de 2015 e 2016 (DOMINSCHKE et al., 2018), somado a adição da biomassa do cultivo do milho. Pergher (2014) relatou emissões de N_2O semelhantes entre lavoura ($1,89 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e lavoura pecuária ($1,65 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), apesar dos sistemas apresentarem acúmulo de biomassa diferentes, $4,2$ e $1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente. No estudo de Piva et al. (2014), a lavoura teve menor emissão ($1,26 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em relação a lavoura pecuária ($4,26 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), mas os sistemas receberam doses de adubações diferentes, 165 kg N ha^{-1} no cultivo de milho e 60 kg N ha^{-1} no azevém sob pastejo, apenas na lavoura pecuária.

A emissão acumulada dos sistemas de uso refletiu nos resultados dos fatores de emissão de N_2O . A dose de fertilizante nitrogenado utilizada foi igual para todos os sistemas, com isso, o menor fator de emissão da PF em relação a Pec indicou o potencial deste sistema integrado na redução das emissões de N_2O , a partir do solo (TABELA 3), similar ao sistema Lav, com fator de emissão semelhante. A fertilização nitrogenada foi a principal atividade avaliada responsável pelo aumento das emissões de N_2O nos sistemas de uso. Contudo, os valores estimados neste experimento foram superiores ao fator de emissão utilizado pelo IPCC de 1% (faixa de incerteza entre $0,3$ e 3%) (IPCC, 2006). O efeito da sazonalidade, principalmente a precipitação pluviométrica, também contribuiu para a emissão de N_2O e consequentemente com a elevação dos fatores de emissão, em todos os sistemas de uso do solo.

TABELA 7 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO COM COEFICIENTES DE PEARSON ENTRE EMISSÕES E ATRIBUTOS DO SOLO.

	C-CH ₄	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	PPA	T	PT	Macro	Micro	DS
Acumulado N-N₂O	0,33 ns	-0,02 ns	0,19 ns	0,74 *	0,37 ns	-0,05 ns	-0,22 ns	0,33 ns	0,43 ns
Acumulado C-CH₄		0,15 ns	-0,14 ns	0,17 ns	0,05 ns	-0,44 ns	-0,52 *	0,24 ns	0,51 *
Concentração N-NH₄⁺ Média			0,70 *	0,28 ns	-0,57 *	0,32 ns	0,17 ns	0,21 ns	-0,37 ns
Concentração N-NO₃⁻ Média				0,32 ns	-0,47 ns	0,35 ns	0,26 ns	0,09 ns	-0,41 ns
PPA do Solo Média					-0,08 ns	-0,17 ns	-0,44 ns	0,51 *	0,28 ns
Temperatura do Solo Média						-0,21 ns	0,05 ns	-0,42 ns	0,51 *
Porosidade Total							0,83 *	0,08 ns	-0,73 *
Macroporosidade								-0,49 ns	-0,59 *
Microporosidade									-0,08 ns

FONTE: O autor (2019).

ns: coeficiente de correlação de Pearson não significativo ($p > 0,05$).

* coeficiente de correlação de Pearson significativo ($p < 0,05$).

3.6.2 Consumo de CH₄ no solo em SIPA

As emissões acumuladas negativas e similares para os sistemas de uso indicaram a capacidade de o solo sob estes sistemas atuar como dreno de CH₄ atmosférico (TABELA 3). O consumo de CH₄ no solo ocorre pelo processo de oxidação de compostos orgânicos a CO₂ por bactérias metanotróficas que utilizam o CH₄ como fonte de carbono e energia (SAGGAR et al., 2008). Enquanto que, a produção de CH₄ requer condições de muito baixa concentração de O₂ e muito baixo potencial redox no solo, com ausência de elétrons alternativos, como NO₃⁻, NO₂⁻, Fe²⁺, SO₄²⁻, para que ocorra a degradação anaeróbica dos compostos orgânicos e a produção de CH₄ por microrganismos metanogênicos (FERRY, 2010; COSTA; LEIGH, 2014; SMITH et al., 2018). Contudo, essas condições podem ser encontradas em microsítios do solo, como agregados ou microporos, mas não são predominantes na maioria dos solos agrícolas sob diferentes manejos, os quais atuam como dreno de CH₄, excluindo cultivos em solos saturados (BAYER et al., 2013; PERGHER, 2014; GODOI et al., 2016; SMITH et al., 2018).

Em estudo no Cerrado, Carvalho et al. (2014b) não encontraram diferença entre emissões acumuladas de sistema de pastagem (1,03 kg C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹) em relação ao sistema com rotação lavoura pastagem (-0,77 kg C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹), apesar do solo sob pastagem atuar como fonte de CH₄ para a atmosfera. Segundo os autores, esse fato está associado a deposição de esterco dos animais, aumentando a incidência de microsítios anaeróbicos no solo. Pergher (2014) também encontrou emissões acumuladas negativas para sistemas integrados em seu estudo, no qual houve emissões iguais (-1,7 kg C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹) para os sistemas de lavoura pecuária e lavoura pecuária floresta, justificadas pela maior aeração do solo desses sistemas, favorecendo a oxidação de CH₄ atmosférico.

3.6.3 Comportamento sazonal nas emissões de N₂O e CH₄

As emissões de N₂O, durante o período de avaliações, sofreram influência da adubação nitrogenada e da precipitação pluviométrica. A aplicação de fertilizante nitrogenado, em cada ciclo de cultivo, promoveu a elevação das emissões de N₂O, anteriormente basais, através dos picos de emissão. Estes ocorrem devido a adição de nitrogênio ao solo aumentando a disponibilidade de substrato, (BOUWMAN et al.,

2002; ZANATTA et al., 2010) para as transformações microbianas de nitrificação e desnitrificação. Além disso, fatores como presença de carbono orgânico no solo (CASTALDELLI et al., 2019), disponibilidade de oxigênio (BOLLMANN; CONRAD, 1998; ZHU et al., 2013) e conteúdo de água no solo (BATEMMAN; BAGGS, 2005; BERGSTERMANN et al., 2011), são determinantes para a magnitude da emissão de N_2O .

O maior pico de emissão de N_2O , no verão-2, promoveu um incremento de mais de 10 vezes nas emissões, em relação a emissão basal, seis dias após a adubação nitrogenada (135 kg N ha^{-1}) (GRÁFICO 2A; GRÁFICO 5). Piva et al. (2014) relatou um aumento de sete vezes na emissão de N_2O três dias após a adubação na cultura de milho (165 kg N ha^{-1}). Durante os 19 dias de duração do pico de emissão, no verão-2, o volume de precipitação foi de 192 mm, sendo que a média histórica para o mês (janeiro) é 172 mm (INMET, 2009), o que resultou em PPA do solo acima de 70 %, favorecendo a desnitrificação (BATEMAN; BAGGS, 2005). O elevado volume de precipitação pluviométrica durante o período somado a adubação refletiu em emissão acumulada no verão-2 três vezes maior do que no verão-1 e no inverno-1 (TABELA 3), além da consequente redução da concentração de NH_4^+ e NO_3^- média (TABELA 6). Carvalho et al. (2017) também relatam o efeito da precipitação pluviométrica na elevação da amplitude dos picos de emissão após a adubação entre as estações seca e chuvosa no Cerrado.

Em condições opostas, no inverno-2, o pico de emissão de N_2O de baixa magnitude, após a adubação nitrogenada (90 kg N ha^{-1}), ocorreu em um período de baixa precipitação pluviométrica acumulada (6,8 mm) durante os oito dias anteriores ao pico de emissão. Durante o inverno-2, a precipitação acumulada foi 57 % menor do que a pluviosidade da média histórica, resultando em PPA média de 57,3 %. O menor volume de precipitação pluviométrica neste ciclo desfavoreceu a produção de N_2O , ocasionando maior concentração de NH_4^+ no solo (TABELA 6) e emissão acumulada quinze vezes menor do que a emissão do verão-2.

Além disso, após um período de estiagem, no início do verão-2, ocorreu pico de emissão de N_2O logo após evento de precipitação pluviométrica (27 mm), elevando a emissão em mais de 10 vezes. Decorrente, possivelmente, pela presença de NO_3^- no solo e pela reativação da microbiota do solo, como relatado no estudo de Bergstermann et al. (2011), no qual sob baixa umidade do solo, a

microbiota apresentou atividade reduzida, e logo após a elevação da PPA, houve um pico da emissão de N_2O , devido a elevação da atividade dos microrganismos.

Em um meta análise com artigos publicados, Yan et al. (2018) relataram que o aumento da precipitação pluviométrica acarretou em aumento da emissão de CO_2 e N_2O em diferentes ecossistemas terrestres. Além disso, alterações na frequência, intensidade e duração de eventos de precipitação e estiagem extremas tem ocorrido (IPCC, 2014), provavelmente devido as mudanças climáticas, elevando as emissões de GEE a partir do solo através de alterações físicas e biológicas do solo (PETRAKIS et al., 2017; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ et al., 2018; YAN et al., 2018).

Quanto ao CH_4 , apesar do predomínio de consumo de CH_4 atmosférico pelo solo, os fluxos oscilaram entre valores positivos e negativos (GRÁFICO 2), pois os processos de metanogênese e metanotrofia acontecem simultaneamente, em diferentes microsítios do solo, anaeróbicos e aeróbicos (KHALIL; BAGGS, 2005); (BREWER et al., 2018), e os atributos físicos podem influenciar na presença de microsítios e na predominância desses processos (DEL GROSSO et al., 2000; KEILUWEIT et al., 2018). Este efeito possivelmente pode ter sido encontrado através das correlações entre emissão acumulada e macroporosidade ($p=-0,52$) e também com a densidade do solo ($p=0,51$) (TABELA 7). O aumento da densidade do solo pode gerar uma diminuição da macroporosidade, reduzindo a difusividade dos gases no solo e consequentemente a taxa de oxidação do CH_4 (SMITH et al., 2000).

Além disso, esses atributos afetam a umidade e a PPA do solo, que também pode interferir na metanotrofia (KHALIL e BAGGS, 2005; VON FISCHER; HEDIN, 2007; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ et al., 2018). Os menores consumos de CH_4 ocorridos no verão-2 e no inverno-1 podem estar relacionados com as maiores PPA do solo médias nestes ciclos de cultivo. Assim como, o maior consumo de CH_4 no inverno-2 também pode ser devido a menor PPA média do solo provocada pelo baixo volume de precipitação pluviométrica registrada neste ciclo. Em seu estudo, Von Fischer e Hedin (2007) encontraram balanço positivo de emissão de CH_4 , entre produção e consumo, com o aumento da umidade do solo acima de 60 % de PPA.

3.7 CONCLUSÕES

Os sistemas integrados de produção agropecuária lavoura pecuária, pecuária floresta e lavoura pecuária floresta são capazes de mitigar as emissões de N_2O , a partir do solo, em relação ao sistema pecuária, porém as emissões destes sistemas são similares as do sistema lavoura.

O sistema pecuária emite maior quantidade de N_2O para a atmosfera, devido a elevada porosidade preenchida por água do solo durante o período de avaliação, que possivelmente proporcionam maior quantidade de microsítios anaeróbicos fornecendo condições favoráveis para a desnitrificação.

Os sistemas de uso lavoura, pecuária, lavoura pecuária, pecuária floresta e lavoura pecuária floresta proporcionam condições favoráveis a oxidação de CH_4 no solo, indicando a capacidade deste atuar como dreno de CH_4 atmosférico.

A sazonalidade é um fator determinante na magnitude das emissões, devido as oscilações da porosidade preenchida por água, provocadas pela variação da precipitação pluviométrica. No ciclo de cultivo com maior porosidade preenchida por água, há maior emissão de N_2O e menor consumo de CH_4 , e o contrário ocorre no ciclo com menor porosidade preenchida por água, com menor emissão de N_2O e maior consumo de CH_4 .

3.8 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P. C.; GOLÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMBUS, J. V.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; CARVALHO, P. C. F. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, v. 330, p. 232-243, 2018.

ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; DENARDIN, L. G. D.; NICHEL, G. D.; COSTA, S.; SILVA, R.; BALERINI, F.; CARVALHO, P. C. D.; FRANZLUEBBERS, A. J. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 21-33, 2017.

BALAINÉ, N.; CLOUGH, T. J.; BEARE, M. H.; THOMAS, S. M.; MEENKEN, E. D.; ROSS, J. G. Changes in relative gas diffusivity explain soil nitrous oxide flux dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 5, p. 1496-1505, 2013.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. D. O.; STONE, L. F. **Marco referencial integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2011.

BARRO, R. S.; SAIBRO, J. C. D.; MEDEIROS, R. B. D.; SILVA, J. L. S. D.; VARELLA, A. C. Rendimento de forragem e valor nutritivo de gramíneas anuais de estação fria submetidas a sombreamento por *Pinus elliottii* e ao sol pleno. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 10, p. 1721-1727, 2008.

BATEMAN, E. J.; BAGGS, E. M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. **Biology and Fertility of Soils**, v. 41, n. 6, p. 379-388, 2005.

BAYER, C.; GOMES, J.; VIEIRA, F. C. B.; ZANATTA, J. A.; PICCOLO, M. D.; DIECKOW, J. Soil methane oxidation in a long-term no-tillage system in southern Brazil. **Semina Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1695-1706, 2013.

BERGSTERMANN, A.; CÁRDENAS, L.; BOL, R.; GILLIAM, L.; GOULDING, K.; MEIJIDE, A.; SCHOLEFIELD, D.; VALLEJO, A.; WELL, R. Effect of antecedent soil moisture conditions on emissions and isotopologue distribution of N₂O during denitrification. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 2, p. 240-250, 2011.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: ASA, 1986. p.363-375.

BOENI, M.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; CONCEIÇÃO, P. C.; DICK, D. P.; KNICKER, H.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M. Organic matter composition in density fractions of cerrado ferralsols as revealed by CPMA¹³C NMR: Influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 80-86, 2014.

BOLLMANN, A.; CONRAD, R. Influence of O₂ availability on NO and N₂O release by nitrification and denitrification in soils. **Global Change Biology**, v. 4, n. 4, p. 387-396, 1998.

BONETTI, J. D. A.; ANGHINONI, I.; IVONIR GUBIANI, P.; CECAGNO, D.; DE MORAES, M. T. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 280-291, 2019.

BOUWMAN, A. F.; BOUMANS, L. J. M.; BATJES, N. H. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, p. 6-1-6-13, 2002.

BREWER, P. E.; CALDERÓN, F.; VIGIL, M.; VON FISCHER, J. C. Impacts of moisture, soil respiration, and agricultural practices on methanogenesis in upland soils as measured with stable isotope pool dilution. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 127, p. 239-251, 2018.

CARVALHO, A. M. D.; DE OLIVEIRA, W. R. D.; RAMOS, M. L. G.; COSER, T. R.; DE OLIVEIRA, A. D.; PULROLNIK, K.; SOUZA, K. W.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L. Soil N₂O fluxes in integrated production systems, continuous pasture and cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 69-83, 2017.

CARVALHO, P. C. D.; DE MORAES, A.; PONTES, L. D.; ANGHINONI, I.; SULC, R. M.; BATELLO, C. Definitions and terminologies for integrated crop-livestock system. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 1040-1046, 2014a.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; FRAZÃO, L. A.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the brazilian cerrado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 183, p. 167-175, 2014b.

CARVALHO, P. C. D.; ANGHINONI, I.; DE MORAES, A.; DE SOUZA, E. D.; SULC, R. M.; LANG, C. R.; FLORES, J. P. C.; LOPES, M. L. T.; DA SILVA, J. L. S.; CONTE, O.; WESP, C. D.; LEVIEN, R.; FONTANELI, R. S.; BAYER, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 88, n. 2, p. 259-273, 2010.

CASTALDELLI, G.; COLOMBANI, N.; SOANA, E.; VINCENZI, F.; FANO, E. A.; MASTROCICCO, M. Reactive nitrogen losses via denitrification assessed in saturated agricultural soils. **Geoderma**, v. 337, p. 91-98, 2019.

CECAGNO, D.; COSTA, S.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; MARTINS, A. P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; BALERINI, F.; FINK, J. R.; CARVALHO, P. C. D. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 54-62, 2016.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D.; LEVIEN, R.; WESP, C. D. Evolution of soil physical attributes in an integrated crop-livestock system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1301-1309, 2011.

COSTA, K. C.; LEIGH, J. A. Metabolic versatility in methanogens. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 29, p. 70-75, 2014.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Soil physical attributes and soybean production in a crop-livestock integration system with brachiaria sp and glycine max. **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, p. 1180-1186, 2012.

DEL GROSSO, S. J.; PARTON, W. J.; MOSIER, A. R.; OJIMA, D. S.; POTTER, C. S.; BORKEN, W.; BRUMME, R.; BUTTERBACH-BAHL, K.; CRILL, P. M.; DOBBIE, K.; SMITH, K. A. General CH₄ oxidation model and comparisons of CH₄ oxidation in natural and managed systems. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 4, p. 999-1019, 2000.

DOMINSCHKE, R.; LANG, C. R.; SCHUSTER, M. Z.; UTIMA, A.; PADILHA, G.; VALESSA, R. S. Componente lavoura em sistemas integrados de produção agropecuária em área de proteção ambiental. In: LANG, C. R.; MORAES, A.; DOMINSCHKE, R. (Coord.). **Sistemas integrados de produção agropecuária na promoção da intensificação sustentável**. Curitiba: UFPR, 2018.

EASTHAM, J.; ROSE, C. W. Pasture evapotranspiration under varying tree planting density in an agroforestry experiment. **Agricultural Water Management**. v. 15, n. 1, p. 87-105, 1988.

FAO. An international consultation on integrated crop livestock systems for development: The way forward for sustainable production intensification. **Integrated Crop Management**. 2010. v. 13, 64 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.38, n.2, p. 109-112, 2014.

FERRY, J. G. The chemical biology of methanogenesis. **Planetary and Space Science**, v. 58, n. 14-15, p. 1775-1783, 2010.

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Fractions of soil organic matter under pasture, tillage system and crop-livestock integration. **Semina-Ciencias Agrarias**, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.

GREGORICH, E.; JANZEN H.; HELGASON, B.; ELLERT, B. Nitrogenous gas emissions from soils and greenhouse gas effects. In: SPARKS, D.L. (Ed). **Advances in Agronomy**. v.132. p. 39-74, 2015.

GODOI, S. G.; NEUFELD, Â. D. H.; IBARR, M. A.; FERRETO, D. O. C.; BAYER, C.; LORENTZ, L. H.; VIEIRA, F. C. B. The conversion of grassland to acacia forest as an effective option for net reduction in greenhouse gas emissions. **Journal of Environmental Management**, v. 169, p. 91-102, 2016.

HAMBRIDGE, J. **QuikChem method 12-107-04-1-J: determination of nitrate in 2M KCl soil extracts by flow injection analysis**. Loveland: Lachat Instruments; 2007a.

HAMBRIDGE, J. **QuikChem method 12-107-06-2-F: determination of ammonia (salicylate) in 2 M KCl soil extracts by flow injection analysis (high throughput)**. Loveland: Lachat Instruments; 2007b.

INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990. Brasília: INMET, 2009. 465.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. CORE WRITING TEAM; PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (Eds.). Geneva: IPCC, 2014.151 p.

IPCC. **2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.** In: EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Published: IGES, Japan, 2006.

KARKI, U.; GOODMAN, M.S. Microclimatic differences between young longleaf-pine silvopasture and open-pasture. **Agroforestry System**. v. 89, n. 2, p. 319-325, 2013.

KEILUWEIT, M.; GEE, K.; DENNEY, A.; FENDORF, S. Anoxic microsites in upland soils dominantly controlled by clay content. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 118, p. 42-50, 2018.

KHALIL, M. I.; BAGGS, E. M. CH₄ oxidation and N₂O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH₄ concentrations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 10, p. 1785-1794, 2005.

KIRCHNER, R.; SOARES, A. B.; SARTOR, L. R.; ADAMI, P. F.; MIGLIORINI, F.; FONSECA, L. Performance of hibernar forages under distinct brightness levels. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 11, p. 2371-2379, 2010.

MCTI. **Terceira comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima – Volume III.** Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. D. F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. D. A.; KUNRATH, T. R. Integrated crop–livestock systems in the brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014.

MOREIRA, W. H.; BETIOLI, E.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA, M. A. T.; FRANCO, H. H. S. Physical properties of an oxisol in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 389-400, 2012.

MOSIER, A.R. Chamber and isotope techniques. In: ANDREAE, M.O., SCHIMEL, D.S. (Ed.). **Exchange of traces gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem Workshop.** Berlin, Wiley; 1989. p.175-187.

NASCIMENTO, D. M. D.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; SILVA, A. H. D.; FAVARETTO, N.; PARRON, L. M. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 292-299, 2019.

PARKIN, T., MOSIER, A., SMITH, J., VENTEREA, R., REICOSKY, D, DOYLE, G., MCCARTY, G. BAKER, J. Chamber-based trace gas flux measurement protocol. **USDA-ARS GRACE net**, 2003.

PERGHER, M. **Emissão de óxido nitroso e metano do solo e de dejetos bovinos em sistemas integrados de produção com ILP e ILPF.** 57 f. Dissertação (Mestre em Ciência do Solo) – Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

PETRAKIS, S.; SEYFFERTH, A.; KAN, J.; INAMDAR, S.; VARGAS, R. Influence of experimental extreme water pulses on greenhouse gas emissions from soils. **Biogeochemistry**, v. 133, n. 2, p. 147-164, 2017.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; DE MORAES, A.; TOMAZI, M.; PAULETTI, V.; BARTH, G.; PICCOLO, M. D. C. Soil gaseous N₂O and CH₄ emissions and carbon pool due to integrated crop-livestock in a subtropical ferralsol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 87-93, 2014.

PONTES, L. D.; BARRO, R. S.; SAVIAN, J. V.; BERNDT, A.; MOLETTA, J. L.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; BAYER, C.; CARVALHO, P. C. D. Performance and methane emissions by beef heifer grazing in temperate pastures and in integrated crop-livestock systems: The effect of shade and nitrogen fertilization. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 253, p. 90-97, 2018.

PORTUGAL, T.; CAMPOS, B. M.; MARTIN, D. M.; MORAES, R. F.; SCHUSTER, M. Z.; SZYMCAK, L. S.; MEZZALIRA, J. C.; MORAES, A.; MONTEIRO, A. L. G.; CARVALHO, P. C. F.; MOLENTO, M. B. Componente pastoril em sistema integrado de produção agropecuária em área de proteção ambiental. In: LANG, C. R.; MORAES, A.; DOMINSCHKE, R. (Coord.). **Sistemas integrados de produção agropecuária na promoção da intensificação sustentável**. Curitiba: UFPR, 2018.

SAGGAR, S.; TATE, K. R.; GILTRAP, D. L.; SINGH, J. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide and methane in New Zealand terrestrial ecosystems and their mitigation options: A review. **Plant and Soil**, v. 309, n. 1, p. 25-42, 2008.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.

SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, A. R.; NIE, C.; HILL, P. W.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Extreme flood events at higher temperatures exacerbate the loss of soil functionality and trace gas emissions in grassland. **Soil Biology and Biochemistry**, 2018.

SILVA, A. S.; COLOZZI, A.; NAKATANI, A. S.; ALVES, S. J.; ANDRADE, D. D.; GUIMARAES, M. D. Microbial characteristics of soils under an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 39, n. 1, p. 40-48, 2015.

SILVA, F. D. D.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 60-69, 2014.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: Interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 10-20, 2018.

SMITH, K. A.; DOBBIE, K. E.; BALL, B. C.; BAKKEN, L. R.; SITAULA, B. K.; HANSEN, S.; BRUMME, R.; BORKEN, W.; CHRISTENSEN, S.; PRIEME, A.; FOWLER, D.; MACDONALD, J. A.; SKIBA, U.; KLEMEDTSSON, L.; KASIMIR-KLEMEDTSSON, A.; DEGORSKA, A.; ORLANSKI, P. Oxidation of atmospheric methane in northern european soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. **Global Change Biology**, v. 6, n. 7, p. 791-803, 2000.

SOARES, A. B.; BERNARDON, A.; AIOLFI, R. B. Forage yield, rate of CO₂ assimilation, and quality of temperate annual forage species grown under artificial shading conditions. **Ciência Rural**, v. 46, n. 6, p. 1064-1069, 2016.

SOUZA, E. D. D.; COSTA, S. E. V. G. D. A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C. V. S. D.; CARVALHO, P. C. D. F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2010.

SUGAMOSTO, M. L. **Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do centro de estações experimentais do cangüiri, município de pinhais - paraná.** (Mestre em Ciência do Solo). Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2002.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (Ed.). Manual de métodos de análise do solo. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2017.

VON FISCHER, J. C.; HEDIN, L. O. Controls on soil methane fluxes: Tests of biophysical mechanisms using stable isotope tracers. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 21, n. 2, 2007.

WELL, R.; KURGANOVA, I.; DE GERENYU, V. L.; FLESSA, H. Isotopomer signatures of soil-emitted N₂O under different moisture conditions - a microcosm study with arable loess soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 38, n. 9, p. 2923-2933, 2006.

WRAGE, N.; VELTHOF, G. L.; VAN BEUSICHEM, M. L.; OENEMA, O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 33, p. 1723-1732, 2001.

WRAGE-MÖNNIG, N.; HORN, M. A.; WELL, R.; MÜLLER, C.; VELTHOF, G.; OENEMA, O. The role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide revisited. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 123, p. A3-A16, 2018.

WU, D.; CÁRDENAS, L. M.; CALVET, S.; BRÜGGEMANN, N.; LOICK, N.; LIU, S.; BOL, R. The effect of nitrification inhibitor on N₂O, no and N₂ emissions under different soil moisture levels in a permanent grassland soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 113, p. 153-160, 2017.

YAN, G. Y.; MU, C. C.; XING, Y. J.; WANG, Q. G. Responses and mechanisms of soil greenhouse gas fluxes to changes in precipitation intensity and duration: A meta-analysis for a global perspective. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 98, n. 4, p. 591-603, 2018.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; VIEIRA, F. C. B.; GOMES, J.; TOMAZI, M. Nitrous oxide and methane fluxes in south brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1653-1665, 2010.

ZHU-BARBER, X.; STEENWERTH, K. L. Nitrous oxide production from soils in the future: Processes, controls, and responses to climate change. In: HORWATH, W.; KUZUYAKOV, Y. (Eds). **Climate Change Impacts on Soil Processes and Ecosystem Properties**. Elsevier, 2018, p. 131-183.

ZHU, X.; BURGER, M.; DOANE, T. A.; HORWATH, W. R. Ammonia oxidation pathways and nitrifier denitrification are significant sources of N₂O and NO under low oxygen availability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 16, p. 6328, 2013.

4 CONCLUSÃO GERAL

Como visto no experimento avaliado, os sistemas integrados, lavoura-pecuária, pecuária floresta e lavoura pecuária floresta, apresentam potencial de mitigação das emissões de N_2O e CH_4 , a partir do solo, em relação ao sistema pecuária, apesar de que esse potencial foi semelhante a lavoura. Esse resultado principal reforça os dados encontrados nos estudos do Brasil, no entanto, a divergência de respostas está relacionada com a complexidade dos sistemas integrados de produção agropecuária e a necessidade de mais estudos.

Além disso, o efeito da sazonalidade, principalmente da precipitação pluviométrica, foi determinante na magnitude das emissões de CH_4 , e N_2O , indicando a sua importância, além do manejo dos sistemas de uso do solo, na mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor agropecuário possui grande responsabilidade nas emissões globais de gases de efeito estufa, principalmente em relação ao N_2O e ao CH_4 , contudo, sua responsabilidade se estende também, a cumprir a crescente demanda por produção de alimentos, fibras e energia. Nesse contexto, a importante busca por aprimoramentos nos sistemas de produção, aliados a intensificação sustentável, necessita de maior investimento em pesquisas científicas para o entendimento da complexidade e do sinergismo entre os componentes do sistema.

Como visto neste trabalho, a pecuária é um sistema com maior potencial de prejuízo ao ambiente, através das elevadas emissões de N_2O , contudo foram contabilizadas apenas as perdas de nitrogênio do solo para atmosfera, sem considerar o balanço de carbono e nitrogênio no sistema como um todo. Além disso, o fato do sistema lavoura não diferir dos sistemas integrados quanto a emissão de N_2O , deve ser considerado com parcimônia, pois as condições físicas, químicas e biológicas do solo no tratamento experimental lavoura não representam a realidade das lavouras comerciais.

O importante resultado encontrado sobre o potencial de mitigação das emissões pelos sistemas integrados pode ser utilizado como um incentivo para a ampliação dos estudos relacionados a esse assunto. E, avaliações de sistemas de longo prazo, consolidados, são necessárias para o estudo dos efeitos temporais desses sistemas de produção. Além disso, o efeito da sazonalidade dos fatores climáticos revelou a importância da avaliação experimental de emissão de gases por um longo período, considerando várias estações de cultivo e possíveis oscilações climáticas.

6 REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P. C.; GOLÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMBUS, J. V.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; CARVALHO, P. C. F. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, v. 330, p. 232-243, 2018.
- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtrópico brasileiro. In: ARAÚJO, A. P.; AVELAR, B. J. R. (Eds.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: UFV, 2013. p. 13-28.
- ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; DENARDIN, L. G. D.; NICHEL, G. D.; COSTA, S.; SILVA, R.; BALERINI, F.; CARVALHO, P. C. D.; FRANZLUEBBERS, A. J. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 21-33, 2017.
- BALAINÉ, N.; CLOUGH, T. J.; BEARE, M. H.; THOMAS, S. M.; MEENKEN, E. D.; ROSS, J. G. Changes in relative gas diffusivity explain soil nitrous oxide flux dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 5, p. 1496-1505, 2013.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. D. O.; STONE, L. F. **Marco referencial integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2011.
- BARRO, R. S.; SAIBRO, J. C. D.; MEDEIROS, R. B. D.; SILVA, J. L. S. D.; VARELLA, A. C. Rendimento de forragem e valor nutritivo de gramíneas anuais de estação fria submetidas a sombreamento por *Pinus elliottii* e ao sol pleno. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 10, p. 1721-1727, 2008.
- BATEMAN, E. J.; BAGGS, E. M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. **Biology and Fertility of Soils**, v. 41, n. 6, p. 379-388, 2005.
- BAYER, C.; GOMES, J.; VIEIRA, F. C. B.; ZANATTA, J. A.; PICCOLO, M. D.; DIECKOW, J. Soil methane oxidation in a long-term no-tillage system in southern Brazil. **Semina-Ciencias Agrarias**, v. 34, n. 4, p. 1695-1706, 2013.
- BERGSTERMANN, A.; CÁRDENAS, L.; BOL, R.; GILLIAM, L.; GOULDING, K.; MEIJIDE, A.; SCHOLEFIELD, D.; VALLEJO, A.; WELL, R. Effect of antecedent soil moisture conditions on emissions and isotopologue distribution of N₂O during denitrification. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 2, p. 240-250, 2011.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: ASA, 1986. p.363-375.

BOENI, M.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; CONCEIÇÃO, P. C.; DICK, D. P.; KNICKER, H.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M. Organic matter composition in density fractions of cerrado ferralsols as revealed by CPMAS ^{13}C NMR: Influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 80-86, 2014.

BOLLMANN, A.; CONRAD, R. Influence of O_2 availability on NO and N_2O release by nitrification and denitrification in soils. **Global Change Biology**, v. 4, n. 4, p. 387-396, 1998.

BONETTI, J. D. A.; ANGHINONI, I.; IVONIR GUBIANI, P.; CECAGNO, D.; DE MORAES, M. T. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 280-291, 2019.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; SENTELHAS, P. C.; NICODEMO, M. L. F. Produtividade e características biométricas do capim-braquiária em sistema silvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 6, p.449-456, 2014.

BOUWMAN, A. F.; BOUMANS, L. J. M.; BATJES, N. H. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, p. 6-1-6-13, 2002.

BREWER, P. E.; CALDERÓN, F.; VIGIL, M.; VON FISCHER, J. C. Impacts of moisture, soil respiration, and agricultural practices on methanogenesis in upland soils as measured with stable isotope pool dilution. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 127, p. 239-251, 2018.

CARVALHO, A. M. D.; DE OLIVEIRA, W. R. D.; RAMOS, M. L. G.; COSER, T. R.; DE OLIVEIRA, A. D.; PULROLNIK, K.; SOUZA, K. W.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L. Soil N_2O fluxes in integrated production systems, continuous pasture and cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 69-83, 2017.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; FRAZÃO, L. A.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the brazilian cerrado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 183, p. 167-175, 2014b.

CARVALHO, P. C. D.; ANGHINONI, I.; DE MORAES, A.; DE SOUZA, E. D.; SULC, R. M.; LANG, C. R.; FLORES, J. P. C.; LOPES, M. L. T.; DA SILVA, J. L. S.; CONTE, O.; WESP, C. D.; LEVIEN, R.; FONTANELI, R. S.; BAYER, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 88, n. 2, p. 259-273, 2010.

CARVALHO, P. C. D.; BARRO, R. S.; BARTH NETO, A.; NUNES, P. A. A.; MORAES, A.; ANGHINONI, I.; BREDEMEIER, C.; BAYER, C.; MARTINS, A. P.; KUNRATH, T. R.; SANTOS, D. T.; CARMONA, F. C.; BARROS, T.; SOUZA FILHO, W.; ALMEIDA, G. M.; CAETANO, L. A. M.; CECAGNO, D.; ARNUTI, F.; DENARDIN, L. G. O.; BONETTI, J. A.; TONI, C. A. G.; BORIN, J. B. M. Integrating the pastoral component in agricultural systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 47, 2018.

CARVALHO, P. C. D.; DE MORAES, A.; PONTES, L. D.; ANGHINONI, I.; SULC, R. M.; BATELLO, C. Definitions and terminologies for integrated crop-livestock system. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 1040-1046, 2014a.

CASTALDELLI, G.; COLOMBANI, N.; SOANA, E.; VINCENZI, F.; FANO, E. A.; MASTROCICCO, M. Reactive nitrogen losses via denitrification assessed in saturated agricultural soils. **Geoderma**, v. 337, p. 91-98, 2019.

CECAGNO, D.; COSTA, S.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; MARTINS, A. P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; BALERINI, F.; FINK, J. R.; CARVALHO, P. C. D. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 54-62, 2016.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D.; LEVIEN, R.; WESP, C. D. Evolution of soil physical attributes in an integrated crop-livestock system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1301-1309, 2011.

CORREA, R. S.; MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CARVALHO, G. D.; PEREIRA, A. C. C.; MEDEIROS, J. C. Fluxos de óxido nitroso e suas relações com atributos físicos e químicos do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1148-1155, 2016.

COSTA, K. C.; LEIGH, J. A. Metabolic versatility in methanogens. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 29, p. 70-75, 2014.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Soil physical attributes and soybean production in a crop-livestock integration system with *Brachiaria sp* and *Glycine max*. **Ciencia Rural**, v. 42, n. 7, p. 1180-1186, 2012.

DEL GROSSO, S. J.; PARTON, W. J.; MOSIER, A. R.; OJIMA, D. S.; POTTER, C. S.; BORKEN, W.; BRUMME, R.; BUTTERBACH-BAHL, K.; CRILL, P. M.; DOBBIE, K.; SMITH, K. A. General CH₄ oxidation model and comparisons of CH₄ oxidation in natural and managed systems. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 4, p. 999-1019, 2000.

DOMINSCHEK, R.; LANG, C. R.; SCHUSTER, M. Z.; UTIMA, A.; PADILHA, G.; VALESSA, R. S. Componente lavoura em sistemas integrados de produção agropecuária em área de proteção ambiental. In: LANG, C. R.; MORAES, A.; DOMINSCHEK, R. (Coord.). **Sistemas integrados de produção agropecuária na promoção da intensificação sustentável**. Curitiba: UFPR, 2018.

EASTHAM, J.; ROSE, C. W. Pasture evapotranspiration under varying tree planting density in an agroforestry experiment. **Agricultural Water Management**. v. 15, n. 1, p. 87-105, 1988.

EMBRAPA. **ILPF em números**. Sinop: EMBRAPA, 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1064859/ilpf-em-numeros>> Acesso em: 15 jan. 2019.

FAO. An international consultation on integrated crop livestock systems for development: The way forward for sustainable production intensification. **Integrated Crop Management**. 2010. v. 13, 64 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.38, n.2, p. 109-112, 2014.

FERRY, J. G. The chemical biology of methanogenesis. **Planetary and Space Science**, v. 58, n. 14-15, p. 1775-1783, 2010.

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Fractions of soil organic matter under pasture, tillage system and crop-livestock integration. **Semina-Ciencias Agrarias**, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.

GODOI, S. G.; NEUFELD, Â. D. H.; IBARR, M. A.; FERRETO, D. O. C.; BAYER, C.; LORENTZ, L. H.; VIEIRA, F. C. B. The conversion of grassland to acacia forest as an effective option for net reduction in greenhouse gas emissions. **Journal of Environmental Management**, v. 169, p. 91-102, 2016.

GREGORICH, E.; JANZEN H.; HELGASON, B.; ELLERT, B. Nitrogenous gas emissions from soils and greenhouse gas effects. In: SPARKS, D.L. (Ed). **Advances in Agronomy**. v.132. p. 39-74, 2015.

HAMBRIDGE, J. **QuikChem method 12-107-04-1-J: determination of nitrate in 2M KCl soil extracts by flow injection analysis**. Loveland: Lachat Instruments; 2007a.

HAMBRIDGE, J. **QuikChem method 12-107-06-2-F: determination of ammonia (salicylate) in 2 M KCl soil extracts by flow injection analysis (high throughput)**. Loveland: Lachat Instruments; 2007b.

INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990. Brasília: INMET, 2009. 465.

INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normal Climatológica do Brasil 1981 - 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>> Acesso em: 11 jun 2018.

IPCC. **2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. In: EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Published: IGES, Japan, 2006.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. CORE WRITING TEAM; PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (Eds.). Geneva: IPCC, 2014.151 p.

KARKI, U.; GOODMAN, M.S. Microclimatic differences between young longleaf-pine silvopasture and open-pasture. **Agroforestry System**. v. 89, n. 2, p. 319-325, 2013.

KEILUWEIT, M.; GEE, K.; DENNEY, A.; FENDORF, S. Anoxic microsites in upland soils dominantly controlled by clay content. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 118, p. 42-50, 2018.

KHALIL, M. I.; BAGGS, E. M. CH₄ oxidation and N₂O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH₄ concentrations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 10, p. 1785-1794, 2005.

KIRCHNER, R.; SOARES, A. B.; SARTOR, L. R.; ADAMI, P. F.; MIGLIORINI, F.; FONSECA, L. Performance of hibernar forages under distinct brightness levels. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 11, p. 2371-2379, 2010.

MCTI. **Terceira comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima – Volume III**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. D. F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. D. A.; KUNRATH, T. R. Integrated crop–livestock systems in the brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014.

MOREIRA, W. H.; BETIOLI, E.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA, M. A. T.; FRANCO, H. H. S. Physical properties of an oxisol in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 389-400, 2012.

MOSIER, A.R. Chamber and isotope techniques. In: ANDREAE, M.O., SCHIMEL, D.S. (Ed.). **Exchange of traces gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem Workshop**. Berlin, Wiley; 1989. p.175-187.

NASCIMENTO, D. M. D.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; SILVA, A. H. D.; FAVARETTO, N.; PARRON, L. M. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 292-299, 2019.

NOGUEIRA, A. K. S.; RODRIGUES, R. A. R.; SILVA, J. J. N.; BOTIN, A. A.; SILVEIRA, J. G.; MOMBACH, M. A.; ARMACOLO, N. M.; ROMEIRO, S. O. Fluxos de óxido nitroso em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p.1156-1162, 2016.

PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; FERNANDES, P. B.; MÜLLER, M. D.; PIRES, M. F. A.; FERNANDES, E. N.; XAVIER, D. F. Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1176-1183, 2011.

PARKIN, T., MOSIER, A., SMITH, J., VENTEREA, R., REICOSKY, D., DOYLE, G., MCCARTY, G. BAKER, J. Chamber-based trace gas flux measurement protocol. **USDA-ARS GRACE net**, 2003.

PERGHER, M. **Emissão de óxido nitroso e metano do solo e de dejetos bovinos em sistemas integrados de produção com ILP e ILPF**. 57 f. Dissertação (Mestre em Ciência do Solo) – Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

PETRAKIS, S.; SEYFFERTH, A.; KAN, J.; INAMDAR, S.; VARGAS, R. Influence of experimental extreme water pulses on greenhouse gas emissions from soils. **Biogeochemistry**, v. 133, n. 2, p. 147-164, 2017.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; NICODEMO, M. L. F.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G.; PARMEJIANI, R. S. Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. **Bragantia**, v. 74, n. 1, p. 110-119, 2015.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; DE MORAES, A.; TOMAZI, M.; PAULETTI, V.; BARTH, G.; PICCOLO, M. D. C. Soil gaseous N₂O and CH₄ emissions and carbon pool due to integrated crop-livestock in a subtropical ferralsol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 87-93, 2014.

PONTES, L. D.; BARRO, R. S.; SAVIAN, J. V.; BERNDT, A.; MOLETTA, J. L.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; BAYER, C.; CARVALHO, P. C. D. Performance and methane emissions by beef heifer grazing in temperate pastures and in integrated crop-livestock systems: The effect of shade and nitrogen fertilization. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 253, p. 90-97, 2018.

PORTUGAL, T.; CAMPOS, B. M.; MARTIN, D. M.; MORAES, R. F.; SCHUSTER, M. Z.; SZYMCAK, L. S.; MEZZALIRA, J. C.; MORAES, A.; MONTEIRO, A. L. G.; CARVALHO, P. C. F.; MOLENTO, M. B. Componente pastoril em sistema integrado de produção agropecuária em área de proteção ambiental. In: LANG, C. R.; MORAES, A.; DOMINSCHKE, R. (Coord.). **Sistemas integrados de produção agropecuária na promoção da intensificação sustentável**. Curitiba: UFPR, 2018.

RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R. SCHMIDT, G.; BUEGGER, F.; MUNCH, J. C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 38, p. 263–274, 2006.

SAGGAR, S.; TATE, K. R.; GILTRAP, D. L.; SINGH, J. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide and methane in New Zealand terrestrial ecosystems and their mitigation options: A review. **Plant and Soil**, v. 309, n. 1, p. 25-42, 2008.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.

SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, A. R.; NIE, C.; HILL, P. W.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Extreme flood events at higher temperatures exacerbate the loss of soil functionality and trace gas emissions in grassland. **Soil Biology and Biochemistry**, 2018.

SANTOS, D. C.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; VILELA, L.; PULROLNIK, K.; BUFON, V. B.; FRANÇA, A. F. S. Forage dry mass accumulation and structural characteristics of Piatã grass in silvopastoral systems in the Brazilian Savannah. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 233, p. 16–24, 2016.

SATO, J. H.; CARVALHO, A. M.; FIGUEIREDO, C. C.; COSER, T. R.; SOUSA, T. R.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L. Nitrous oxide fluxes in a Brazilian clayey oxisol after 24 years of integrated crop-livestock management. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, p. 55-68, 2017.

SENBAYRAM, M.; WELL, R.; BOL, R.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L.; WI, D. Interaction of straw amendment and soil NO_3^- content controls fungal denitrification and denitrification product stoichiometry in a sandy soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 126, p. 204–212, 2018.

SILVA, A. S.; COLOZZI, A.; NAKATANI, A. S.; ALVES, S. J.; ANDRADE, D. D.; GUIMARAES, M. D. Microbial characteristics of soils under an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 39, n. 1, p. 40-48, 2015.

SILVA, F. D. D.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 60-69, 2014.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: Interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 10-20, 2018.

SMITH, K. A.; DOBBIE, K. E.; BALL, B. C.; BAKKEN, L. R.; SITLAULA, B. K.; HANSEN, S.; BRUMME, R.; BORKEN, W.; CHRISTENSEN, S.; PRIEME, A.; FOWLER, D.; MACDONALD, J. A.; SKIBA, U.; KLEMEDTSSON, L.; KASIMIR-KLEMEDTSSON, A.; DEGORSKA, A.; ORLANSKI, P. Oxidation of atmospheric methane in northern european soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. **Global Change Biology**, v. 6, n. 7, p. 791-803, 2000.

SOARES, A. B.; BERNARDON, A.; AIOLFI, R. B. Forage yield, rate of CO₂ assimilation, and quality of temperate annual forage species grown under artificial shading conditions. **Ciência Rural**, v. 46, n. 6, p. 1064-1069, 2016.

SOUZA, E. D. D.; COSTA, S. E. V. G. D. A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C. V. S. D.; CARVALHO, P. C. D. F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2010.

SUGAMOSTO, M. L. **Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do centro de estações experimentais do cangüiri, município de pinhais - paraná.** (Mestre em Ciência do Solo). Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2002.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (Ed.). Manual de métodos de análise do solo. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2017.

VON FISCHER, J. C.; HEDIN, L. O. Controls on soil methane fluxes: Tests of biophysical mechanisms using stable isotope tracers. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 21, n. 2, 2007.

WELL, R.; KURGANOVA, I.; DE GERENYU, V. L.; FLESSA, H. Isotopomer signatures of soil-emitted N₂O under different moisture conditions - a microcosm study with arable loess soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 38, n. 9, p. 2923-2933, 2006.

WRAGE, N.; VELTHOF, G. L.; VAN BEUSICHEM, M. L.; OENEMA, O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 33, p. 1723-1732, 2001.

WRAGE-MÖNNIG, N.; HORN, M. A.; WELL, R.; MÜLLER, C.; VELTHOF, G.; OENEMA, O. The role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide revisited. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 123, p. A3-A16, 2018.

WU, D.; CÁRDENAS, L. M.; CALVET, S.; BRÜGGEMANN, N.; LOICK, N.; LIU, S.; BOL, R. The effect of nitrification inhibitor on N₂O, no and N₂ emissions under different soil moisture levels in a permanent grassland soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 113, p. 153-160, 2017.

YAN, G. Y.; MU, C. C.; XING, Y. J.; WANG, Q. G. Responses and mechanisms of soil greenhouse gas fluxes to changes in precipitation intensity and duration: A meta-analysis for a global perspective. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 98, n. 4, p. 591-603, 2018.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; VIEIRA, F. C. B.; GOMES, J.; TOMAZI, M. Nitrous oxide and methane fluxes in south brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1653-1665, 2010.

ZHU, X.; BURGER, M.; DOANE, T. A.; HORWATH, W. R. Ammonia oxidation pathways and nitrifier denitrification are significant sources of N₂O and NO under low oxygen availability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 16, p. 6328, 2013.

ZHU-BARBER, X.; STEENWERTH, K. L. Nitrous oxide production from soils in the future: Processes, controls, and responses to climate change. In: HORWATH, W.; KUZUYAKOV, Y. (Eds). **Climate Change Impacts on Soil Processes and Ecosystem Properties**. Elsevier, 2018, p. 131-183.